



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación Estudios de Posgrado

**ESTUDIO DE TECHOS PARA NAVES
INDUSTRIALES RELACIONANDO EL GRANIZO EN
LA ZONA CENTRO DEL PAÍS**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN ESTRUCTURAS

Presenta:

ING. HÉCTOR MARTÍNEZ CORDERO

Director de tesis:

M.I EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO

Puebla, Pue.

Junio 2021



BUAP

Oficio No. SIEP/0938/2021

C. Héctor Martínez Cordero

Matrícula 219470112

Pasante de la Maestría en Ingeniería

con opción terminal en Estructuras

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo con su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Estudio de techos para naves industriales relacionando el granizo en la zona centro del país**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras, asignándose como Director al M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"

H. Puebla de Zaragoza, mayo 6 de 2021

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora

Director



C.c.p. M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

AEPS/JPHT/sco*

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

M. en I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP.
P r e s e n t e :

Por este medio, el que suscribe **M. en I. Edgar Iram Villagrán Arroyo**, Asesor del trabajo de tesis denominado **"Estudio de techos para naves industriales relacionando el granizo en la zona centro del país"**, presentado por el Ing. Héctor Martínez Cordero, con No. de Matrícula **219470112**, estudiante de la Opción Terminal Estructuras de la **Maestría en Ingeniería** de esta Facultad de Ingeniería, informo a usted que, habiendo revisado el contenido temático del documento y su redacción, cumple con las disposiciones reglamentarias, por lo que no existe inconveniente alguno en **autorizar la impresión** de la tesis.

Se hace de su conocimiento para los fines legales a que haya lugar.

Atentamente
Puebla, Pue., a 21 de junio de 2021



M. en I. Edgar Iram Villagrán Arroyo
Asesor

c.c.p. M en I. Ana Elena Posada Sánchez, Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado,
c.c.p. Dr. Juan Pablo Hidalgo Toxqui, Coordinador del programa.
c.c.p. Interesado.
c.c.p. Archivo.

En memoria de mi abuelita
Eufracia García Villalba a
quien le debo sus
enseñanzas, valores, amor y
por ser un ejemplo de vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa María Fernanda por su incondicional estímulo y apoyo en todo momento.

Al M.I Edgar Iram Villagrán Arroyo por su asesoría y revisión de este trabajo, así como los consejos profesionales aportados durante la carrera.

Al M.I Martín Castillo Flores por su aceptación en la maestría y enseñanzas valiosas en sus clases.

A mis padres y hermanos por su motivación y alegría.

ÍNDICE

ÍNDICE	vi
RESUMEN	9
ABSTRAC	9
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I. EL GRANIZO Y LAS NAVES INDUSTRIALES	12
I.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
I.2. CAMBIO CLIMÁTICO, UN FACTOR EN LA PRESENCIA DEL GRANIZO.	16
1.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. Elementos de estudio	20
1.3.2. Casos de estudio	20
CAPITULO II. GRANIZO Y LAS AFECTACIONES EN LOS TECHOS DE NAVES INDUSTRIALES	24
II.1 GRANIZO Y SU FORMACIÓN	24
Tipos de granizo.	25
Velocidades del granizo.	26
II.1.2. PRESENCIA DE GRANIZO EN LA REPÚBLICA MEXICANA	27
Instrumentos de medida	27
Cantidades de granizo	28
II.2. NAVES INDUSTRIALES	31
¿Qué es una nave industrial?	31
Características principales	31
Materiales	32
Tipos de techos	33
Panorama del mercado inmobiliario industrial	34
II.3. DAÑOS EN TECHOS EDIFICIOS INDUSTRIALES A CAUSA DEL GRANIZO	36
II.4. NORMATIVA ACTUAL	38
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE ACUMULACIÓN DE GRANIZO EN DIFERENTES TIPOS DE CUBIERTAS	40
III.1. CONSIDERACIONES POR OTROS REGLAMENTOS	40

III.2. ANÁLISIS DE ACUMULACIÓN DE GRANIZO PARA TECHOS DE PENDIENTE CONSTANTE	48
III.3. PESO VOLUMÉTRICO DEL GRANIZO	57
III.4. PROPUESTA DE DENSIDADES DE GRANIZO PARA TECHOS DE PENDIENTE CONSTANTE	62
III.4.1 CUBIERTAS DE UNA O DOS AGUAS CON CANALÓN EXTERNO (CAÍA LIBRE).....	62
III.4.2 CUBIERTAS DE UNA O DOS AGUAS CON FALDONES AL EXTREMO	64
III.4.3 CUBIERTAS DE DOS AGUAS O MÁS.....	68
III.4.4 CUBIERTAS TIPO “DIENTE DE SIERRA”	71
III.5. ANÁLISIS DE ACUMULACIÓN DE GRANIZO PARA TECHOS CURVOS	73
III.5.1 PROPUESTA DE DENSIDADES DE GRANIZO EN CUBIERTAS CON TECHOS CURVOS.....	76
III.6. CONCLUSIONES	81
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LARGUEROS DE CUBIERTA.....	82
IV.1. ANÁLISIS DE LAS CARGAS	82
IV.1.1 Cargas Muertas.....	82
IV.1.2 Cargas Vivas	84
IV.1.3 Cargas de viento	85
IV.2. ANÁLISIS DE LOS LARGUEROS.....	86
IV.2.1 Momentos máximos resistentes	91
IV.2.2 Cargas máximas permisibles	88
IV.2.2.1 Largueros con un modelo simplemente apoyado.....	88
IV.2.2.2 Largueros con un modelo de continuidad.....	97
IV.2.2.3 Resultados para el sentido débil de los largueros	105
IV.3. COMPARATIVA ENTRE UN LARGUERO SIMPLEMENTE APOYADO Y OTRO CON CONTINUIDAD.....	115
IV.4. CONCLUSIONES.....	122
CAPÍTULO V. EJEMPLOS.....	123
V.1. Ejemplo de cubierta a una sola agua con faldón recto en sus extremos	123
V.2. Ejemplo de cubierta a dos aguas con faldón recto en sus extremos	126
V.3. Ejemplo de cubierta a 4 aguas	129

V.4. Ejemplo de cubierta curva	131
CAPÍTULO VI. BAJADAS DE AGUAS PLUVIALES Y CANALONES	133
GLOSARIO	137
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	138
ANEXO 1 .- LONGITUDES DE SOBRECARGA DE GRANIZO PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN	128
ANEXO 2.- PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LARGUEROS	131
ANEXO 3.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DE LA SOBRECARGA PARA UN TECHO DE NAVE INDUSTRIAL	136
.....	136
ANEXO 4.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DE LARGUEROS DE CUBIERTA.....	139
.....	139

RESUMEN

La sobrecarga por granizo en techos de naves industriales ha sido un problema poco valorado y estudiado a pesar de los muchos registros de daños estructurales que existen dentro y fuera de la República Mexicana, los códigos de diseño locales proporcionan pocos elementos que conlleven a un buen análisis y cálculo estructural. Por lo tanto, en el presente trabajo se facilitan herramientas que permiten analizar el sobrepeso para diferentes configuraciones de techos y grados de inclinación, con el objetivo de proporcionar ayudas de diseño para el ingeniero estructurista, constructores y fabricantes. Mediante investigaciones de campo y registros históricos se generan modelos de acumulación de granizo en las cubiertas, recomendando espesores mínimos y máximos para fines de análisis. En conclusión, los actuales valores que se exponen en los reglamentos del país son escasos y deben actualizarse, pensando siempre en salvaguardar las vidas de los usuarios.

ABSTRAC

Hail overload on roofs of industrial buildings has been a problem little valued and studied despite the many records of structural damage that exist inside and outside the Mexican Republic, local design codes provide few elements that lead to a good analysis and structural calculation. Therefore, in the present work tools are provided that allow analyzing the overweight for different roof configurations and degrees of inclination, with the aim of providing design aids for the structural engineer, builders and manufacturers. Through field investigations and historical records, models of hail accumulation on the roofs are generated, recommending minimum and maximum thicknesses for analysis purposes. In conclusion, the current values set forth in the country's regulations are scarce and should be updated, always thinking of safeguarding the lives of users.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, es frecuente observar que los fenómenos naturales como la lluvia, ciclones y heladas han sido modificados por el cambio climático a nivel mundial, causando severos problemas a la humanidad. El granizo es un fenómeno natural con presencia en todo el mundo, su principal causante son las tormentas eléctricas y su tamaño y cantidad dependerán principalmente de la temperatura del lugar y la altura sobre el nivel del mar.

Las naves industriales forman parte importante de la economía dentro del territorio mexicano, grandes industrias locales y extranjeras como la automotriz y de alimentos, generan miles de empleos cada año, sin embargo, hay un enemigo que ha causado importantes daños a muchas de estas estructuras, generando pérdidas monetarias, materiales y vidas humanas, el granizo. En estados como Puebla, Hidalgo, Jalisco, Tlaxcala y el estado de México se han registrado en la última década numerosos eventos de este fenómeno natural, como la granizada en 2019 en Tlaquepaque, Jalisco, cuyo espesor alcanzó los 2 metros, o el colapso de un techo por sobrecarga de hielo en Tetla, Tlaxcala en junio del 2021 donde se registró una persona fallecida.

Hasta el presente, no hay una guía o propuestas en los reglamentos de construcción, no todos los estados cuentan con un código y la mayoría se basan en las normas técnicas complementarias de la Ciudad de México, la cual se limita a proporcionar un par de recomendaciones para considerar una sobrecarga de granizo ¿serán válidos estos valores?, por los eventos registrados en los techos de naves industriales, se considera no son suficientes, la investigación ha sido escasa y no tan profunda como sucede con otros fenómenos como los sismos, más sin embargo, los daños estructurales en cubiertas ligeras por el peso adicional del hielo acumulado son cada vez mayores, incluso el código reglamentario para el municipio de Puebla (COREMUN), en su última actualización que corresponde al año 2019, ya no se hace referencia a la consideración o valoración de este fenómeno en las cubiertas.

Es importante que en nuevas versiones de reglamentos locales se exponga un análisis del granizo que permita al ingeniero estructurista tener las herramientas adecuadas para el diseño de techos ligeros, independientemente que estos sean para la industria o no, de lo contrario, empresas fabricantes, constructoras y calculistas seguirán aplicando las mismas prácticas obteniendo los mismos resultados.

Este trabajo tiene como objetivo proporcionar dichas herramientas apoyado de hechos registrados y levantados para cuatro tipo de cubiertas: techos a un agua, a dos aguas o más, techumbres tipo diente de sierra y con geometría curva, mismos que son los de uso común en nuestro país, se realiza a partir del capítulo III un análisis de acumulación de granizo cuya principal variable será la pendiente, resultando que para mayor inclinación menor será la longitud de revisión por sobrecarga, posteriormente se proponen esquemas de sobrecarga, que obedecen a espesores máximos y mínimos posibles que pudieran registrarse durante una lluvia obteniendo así tablas, gráficos y ecuaciones de fácil lectura que proporcionan toda esta información.

Se analiza uno de los principales elementos en cubiertas ligeras, los largueros, revisando a flexión biaxial diferentes peraltes y calibres, así como los perfiles en C y Z, arrojando gráficas y tablas que permiten conocer la carga máxima que puede soportar el elemento teniendo como variable la longitud o separación de los pórticos principales, con el objetivo de ahorrar tiempo al usuario en elegir el mejor perfil para su proyecto.

El rápido desalojo del agua y granizo en las cubiertas ligeras garantizan un funcionamiento óptimo de toda la estructura, evitando goteras y sobrecargas no deseadas, por lo que se generan recomendaciones para el drenaje pluvial, bajadas de PVC, de lámina y canalones tomando en cuenta diferentes anchos de cubiertas y separación entre marcos principales.

Este estudio podría estimular el debate en organismos gubernamentales y colegios de ingenieros para que consideren al granizo como un factor importante en el diseño estructural de naves industriales.

CAPÍTULO I. EL GRANIZO Y LAS NAVES INDUSTRIALES

Históricamente las naves industriales han sido pieza importante en el crecimiento económico de un país, utilizadas como bodegas, fábricas, centros de distribución, etc. En el presente, su construcción va en aumento gracias a que pueden abarcar grandes espacios con poca inversión, sin embargo, no dejan de ser vulnerables a las condiciones naturales que se presentan en una región, como son los sismos y los fuertes vientos, sumado a ellos está la presencia del granizo, cuyas afectaciones y problemáticas se estarán abarcando en este estudio.

I.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los códigos de construcción y de diseño que rigen en la República Mexicana no profundizan el tema del granizo, limitándose a sugerir una densidad de 100 kg/m^2 al fondo del valle del techo. Son escasas las recomendaciones para este fenómeno natural y queda la incertidumbre para el ingeniero estructurista de cómo interactuar con el sobrepeso que en varias ocasiones ha provocado daños importantes en las estructuras de este tipo, donde la inversión de reparación es fuerte y sumado a ello las pérdidas de materia prima, maquinaria, equipo electrónico, en fin, todo lo que estuvo en contacto con el agua que se filtró en la nave a consecuencia de un techo dañado estructuralmente o en el peor de los casos, una cubierta caída.

Por gravedad, el granizo se acumula en las zonas bajas de la techumbre, junto a la zona del canalón; En zonas frías como el estado de Puebla, Hidalgo, Estado de México, por mencionar algunos, las gotas de hielo no se derriten rápidamente formando una gran roca que rápidamente obstruye las salidas de agua pluvial. Si las estructuras han fallado significa que la densidad recomendada por la normativa vigente es escasa.

Es de gran interés el estudio del granizo, los tipos que se pueden presentar en una zona de estudio, cantidades mínimas y máximas en una lluvia para que con ello podamos adoptar medidas que permitan prevenir daños estructurales importantes, así como recabar las estrategias que se han tomado por los profesionistas calculistas y constructores para tener una cartera amplia de posibles soluciones.

En mi ejercicio profesional, me ha tocado ser participe en la revisión de una nave industrial a un agua que yo mismo diseñé considerando únicamente 100 kg/m^2 a un cuarto de longitud de toda el agua. En la granizada en Jalisco que ocurrió en Julio de 2019 la estructura se vio afectada como se podrá observar en las figuras I.1, I.2 y I.3.



Fig. I.1 Vista del techo afectado, se aprecia el dobléz de la lámina en varios puntos por la acumulación del granizo (autoría propia, 2019)



Fig. 1.2 Vista panorámica de la nave, se aprecian los daños en el techo y dentro de la nave por el agua que se introdujo (autoría propia, 2019)



Fig. 1.3 Vista local de la parte inferior del techo afectado, se aprecia claramente el daño en los largueros (autoría propia, 2019)

Para que el techo de la nave haya presentado esos detalles estructurales, la carga de granizo acumulada debió de rebasar los 300 kg/m^2 además de que estuvo concentrada por varias horas.

Un caso adicional se presentó hace poco, aun cuando no se considera temporada de lluvias en nuestro país. Una nave industrial a base de armaduras sufrió colapso por el exceso de granizo que cayó el paso 14 de abril de 2021, el techo es a dos aguas y falló la armadura principal al centro del claro.



Fig. 1.4 Vista de la armadura colapsada. Se observa la flexión del elemento al centro del claro (Ing. Marco Antonio Sorcia, abril 2021)

Las principales investigaciones arrojaron que además de ser una estructura con falta de mantenimiento, el granizo cayó en cantidades no esperadas lo que provocó que el canalón quedara totalmente obstruido evitando el desalojo del agua y el hielo.

I.2. CAMBIO CLIMÁTICO, UN FACTOR EN LA PRESENCIA DEL GRANIZO.

En los últimos años se nota cada vez más la variación del clima debido a lo que conocemos como calentamiento global. El aumento de la temperatura del planeta a consecuencia de las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero están provocando alteraciones que de manera natural no se producían (ACCIONA, 2020).

La repercusión del cambio climático sobre fenómenos hidrometeorológicos como los fuertes vientos, lluvias de gran duración, tormentas eléctricas y tormentas con granizo están en aumento, afectando la economía de un país en distintos sectores como la agricultura, ganadería e industrial.

Estudios y estadísticas desde hace varios años comprueban y reafirman la realidad del cambio climático (figura I.1).

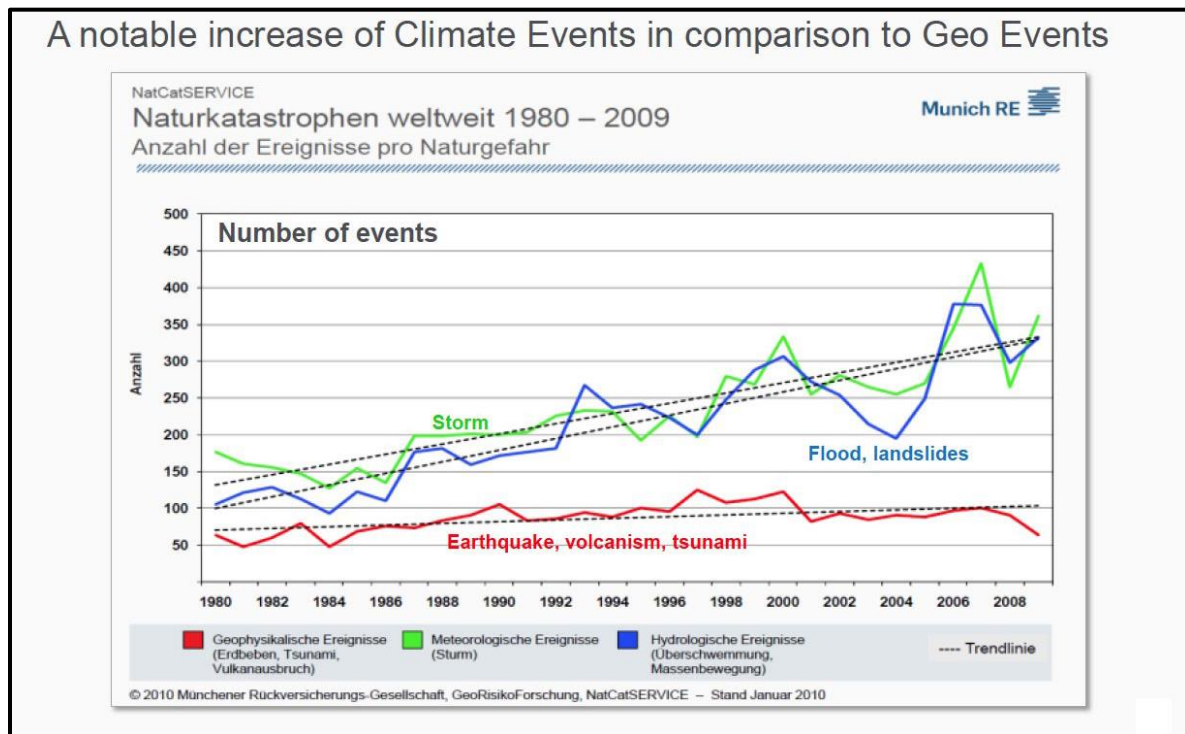


Fig. I.5 Comparación de los eventos climatológicos en comparación a eventos geológicos (RE, 2012)

Para que el granizo se forme es necesario que las corrientes de aire en una tormenta lleguen a una altura tal que las temperaturas son muy bajas. El calentamiento ha provocado que la cota de congelamiento aumente introduciendo más energía y provocando una evaporación más intensa que aporta mayor cantidad de vapor de agua a la atmósfera que facilita la formación de tormentas eléctricas y las gotas de agua se congelen más rápido (Universidad de Anguila Oriental, 2017).

En la República Mexicana, ha registrado granizadas con mayor intensidad (figura 1.2) e incluso con tamaños nunca vistos. Ante el cambio climático, las recientes afectaciones de estructuras ligeras a causa de las precipitaciones en forma de hielo han despertado una inquietud no solo para el ingeniero sino para el propio inversionista generando un ambiente de preocupación sobre cómo lidiar con este fenómeno natural.



Fig. 1.6 Día después de la granizada ocurrida en Tlaquepaque Jalisco en Julio de 2019 (EXCELSIOR, 2019)

En lo que va del año 2021 se han registrado varios acontecimientos en diferentes partes de la república, como por ejemplo el colapso del techo que cubría el Templo Mayor en la ciudad de México, o bien en el estado de México, donde en la misma granizada se reportaron el colapso de dos estructuras, el techo de una escuela y el techo de un edificio. A pesar de que estas estructuras no son naves industriales como tal, si son cubiertas ligeras que de igual manera hay escasa información para su análisis estructural y recomendaciones de servicio.



Fig. 1.7 Techo que cubría al Templo Mayor en la Ciudad de México (UNIVERSAL, 2021)



Fig. 1.8 Techo colapsado por peso de granizo en un edificio en el Estado de México el pasado mes de abril (DigitalMex, 2021)



Fig. 1.9 Techo que cubría a la Escuela Normal de Educación Física (EFEF) en el Estado de México el pasado mes de abril (Toluca, 2021)

1.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El procedimiento de investigación y generación de resultados se realizará recopilando información de lluvias con presencia de granizo en los últimos años para la zona centro de la República Mexicana en páginas de internet gubernamentales, portales dedicados al clima, revistas conocidas y artículos periodísticos. Con la información recabada realizar modelos que ayuden a determinar la cantidad de masa que podría acumularse en los techos para diferentes configuraciones de pendientes. En seguida, analizar algunos elementos estructurales que componen los techos de naves industriales, como lo son: los largueros, canalones y bajadas de aguas pluviales para generar recomendaciones para el usuario.

1.3.1. Elementos de estudio

Los elementos de estudio serán naves industriales cuyos techos sean construidos en acero estructural y lámina galvanizada, aquellas utilizadas comúnmente para fábricas, bodegas o de uso mixto. Los techos estudiados abarcarán estados como Puebla, Hidalgo, Estado de México, Jalisco y Tlaxcala.

1.3.2. Casos de estudio

Se analizarán los siguientes casos (figuras I.3 a I.7):

a) Techos a dos aguas

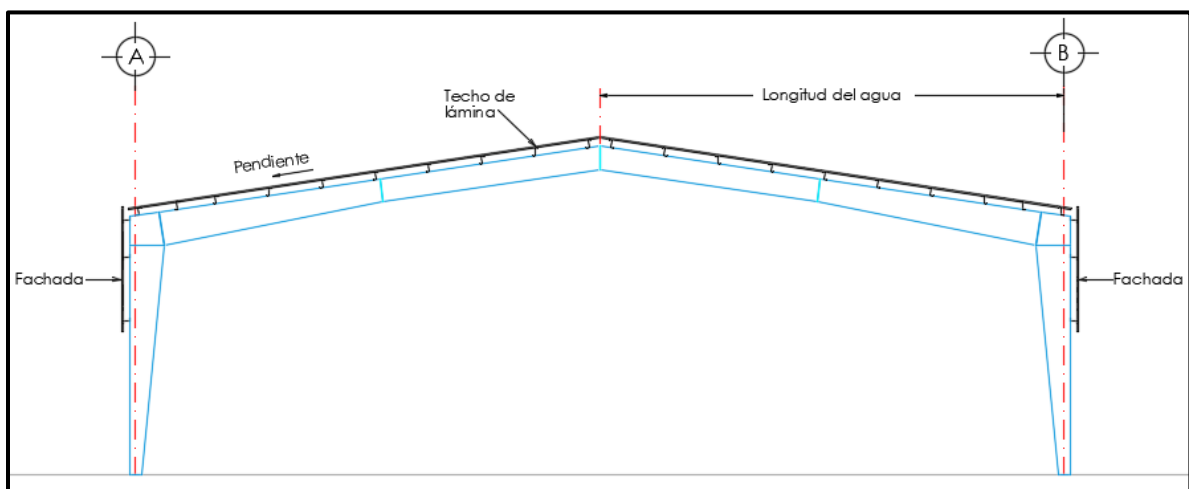


Fig. I.10 Caso de estudio 1. Techo a dos aguas (autoría propia)

b) Techos de más de dos aguas

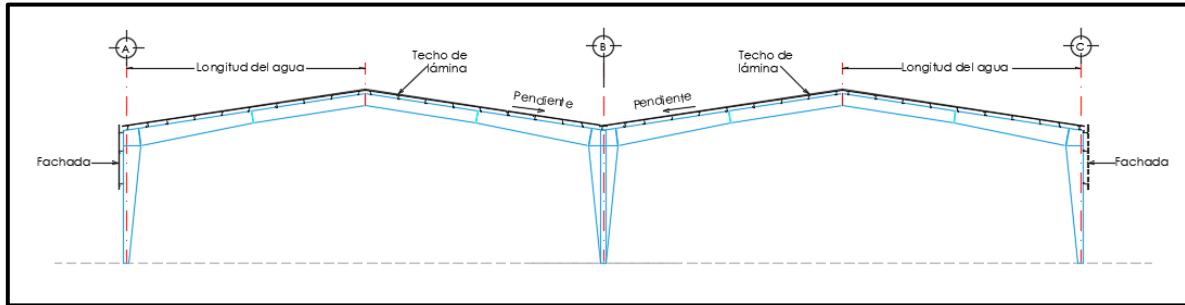


Fig. I.11 Caso de estudio 2. Techo de 4 aguas o más (autoría propia)

c) Techos tipo “diente de sierra”

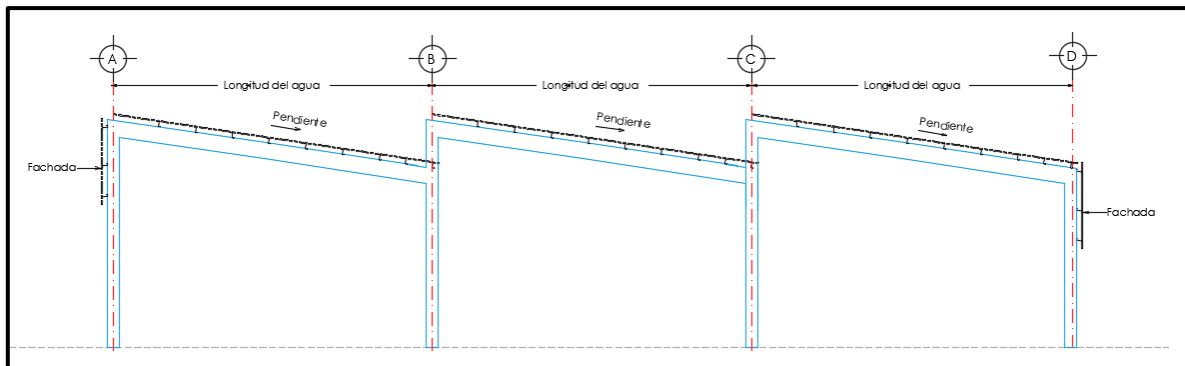
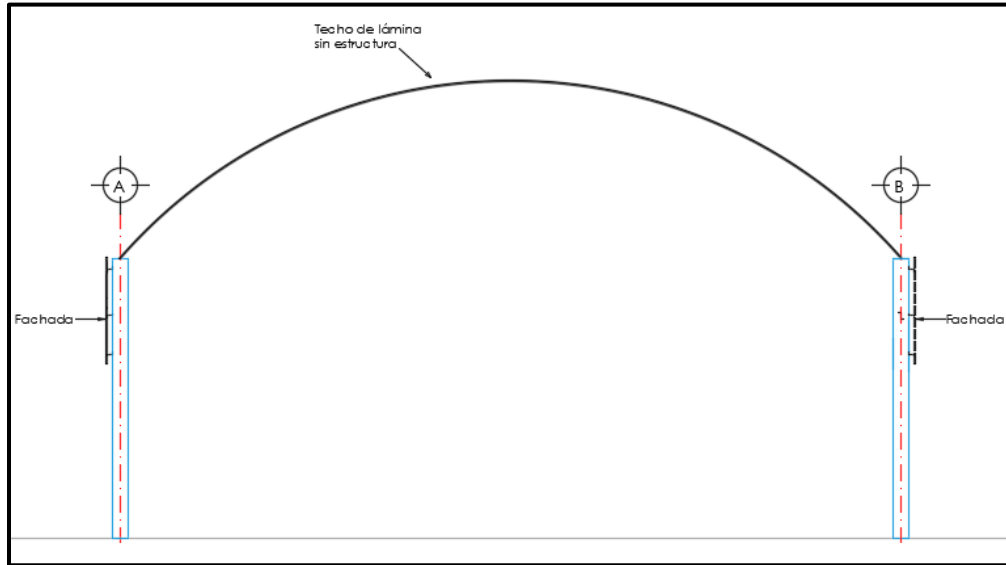


Fig. I.12 Caso de estudio 3. Techo tipo diente de sierra (autoría propia)

d) Techos sin estructura o autoportantes



e) Techos con faldones rectos y sin faldones rectos

Fig. I.13 Caso de estudio 4. Techo tipo autoportante (autoría propia)

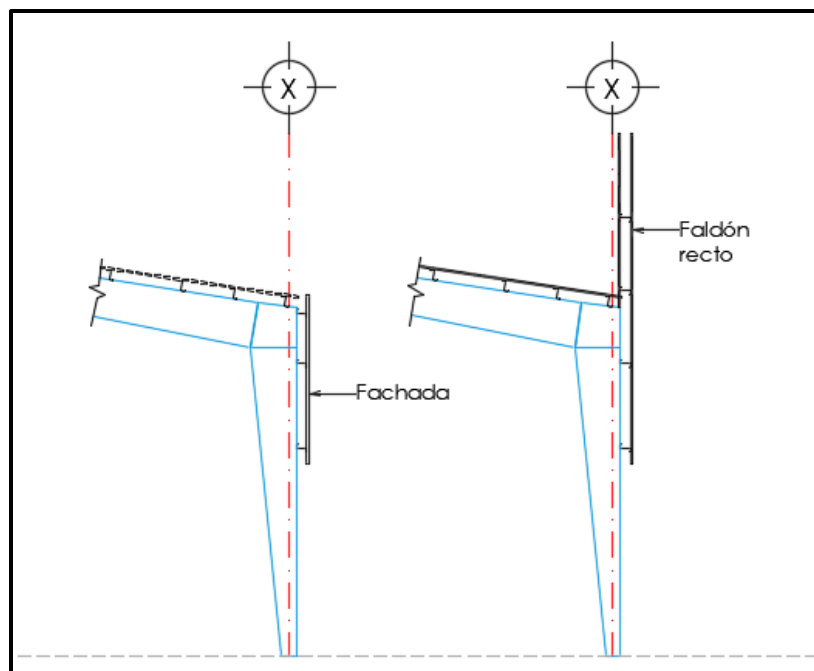


Fig. I.14 Caso de estudio 5. Techos con y sin faldón recto (autoría propia)

Los 5 casos de estudios se analizarán para la pendiente mínima del 2%, hasta pendientes de más del 20% y con longitudes del agua de 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 metros.

La caída de granizo sigue siendo un fenómeno con el cual existe mucha incertidumbre para determinar principalmente la cantidad de materia que caerá en una tormenta, ya vimos que se puede presenciar de manera exorbitante trayendo consigo innumerables daños y pérdidas y los reglamentos actuales no profundizan el tema. En el siguiente capítulo se podrá observar la frecuencia de granizadas en el territorio mexicano, así como registro de daños importantes en naves industriales, el crecimiento en la construcción de edificios industriales y su tendencia para un futuro no muy lejano.

CAPITULO II. GRANIZO Y LAS AFECTACIONES EN LOS TECHOS DE NAVES INDUSTRIALES

La presencia del granizo en techos industriales puede llegar a ser muy problemático, para saber cómo interactuar con este factor debemos conocer las características de cada elemento, primero de manera individual y posteriormente la relación de ambos. En la actualidad se han construido un gran número de naves industriales, sin embargo, muchas de ellas fallan a causa de precipitaciones con hielo, ¿Qué se ha hecho? ¿Qué medidas constructivas y de cálculo estructural se ha considerado? ¿Cuáles son las tendencias de ingeniería y climatológicas? Estas y otras preguntas tendrán respuesta en este capítulo.

II.1 GRANIZO Y SU FORMACIÓN

El granizo es un tipo de precipitación sólida que se presenta en forma de bola. Estos trozos de hielo se originan cuando las corrientes ascendentes en tormentas eléctricas llevan las gotas de lluvia hacia arriba en áreas extremadamente frías de la atmósfera (figura II.1) provocando que se congelen.

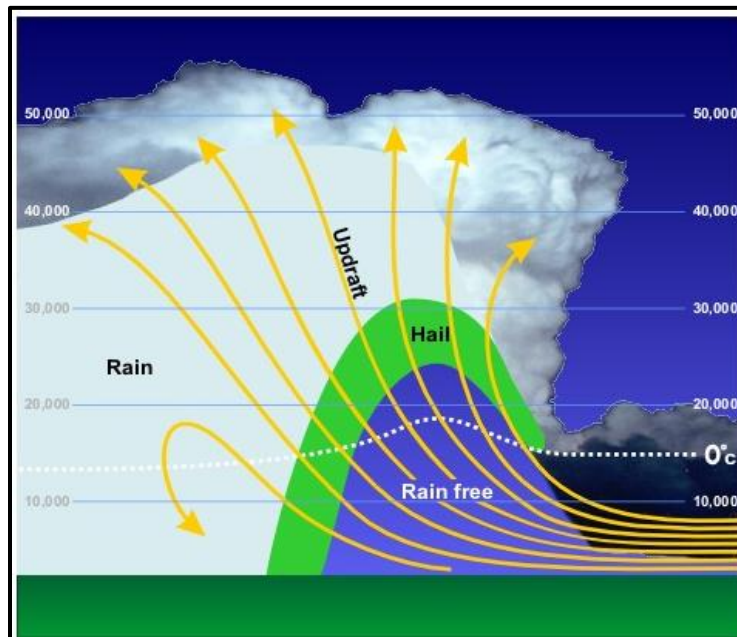


Fig. II.1 Corrientes ascendentes en una tormenta eléctrica (National Weather Service, s.f.)

Las gotas de agua se congelan dentro tormentas formados por nubes del tipo cumulonimbus (figura II.1.2) a alturas superiores al nivel de congelación, este fenómeno climático ocurre mayormente durante el verano entre los paralelos 20 y 50, tanto en el hemisferio norte como en el sur (CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, 2020)

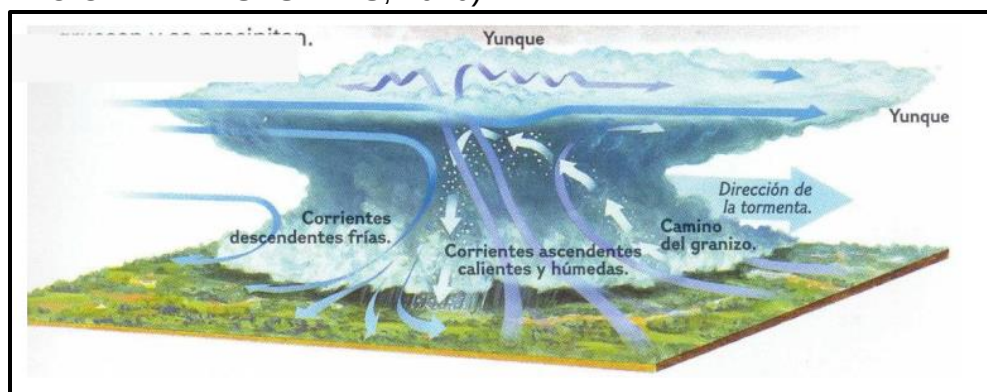


Fig. II.2 Formación de tormentas de granizo (National Geographic Society, 1998)

Tipos de granizo.

Cuando las gotas congeladas se vuelven lo suficientemente pesadas como para vencer la fuerza de la corriente ascendente, caen por gravedad, si es impulsado por el viento trae innumerables daños materiales. El tamaño del granizo varía desde los 2 mm hasta los 1140 mm de diámetro (tabla II.1.1). Es común que el tamaño se estime comparándolo con algún objeto conocido.

Tamaño del granizo	Diámetro	
	En Pulgadas	En milímetros
Chícharo	< 1/4	< 63.5
Pastilla	1/2	127
Moneda de diez centavos	7/10	178
Moneda de 50 centavos	1	254
Moneda de dos pesos	1 1/4	318
Nuez	1 1/2	381
Pelota de golf	1 3/4	445
Huevo de gallina	2	508
Pelota de tenis	2 1/2	635
Pelota de Beisbol	2 3/4	699
Taza de té	3	762
Toronja	4 1/2	1143

Tabla II.1 Tamaños de granizo registrados en tormentas (National Weather Service, s.f.)

Velocidades del granizo.

Las velocidades del granizo dependen principalmente del tamaño, de la fricción entre el granizo y el aire. Se ha estimado que para diámetros de una pulgada toman velocidades de hasta 40 km/hr mientras que para los de cuatro pulgadas de diámetro o mayores llegan a caer a una velocidad mayor a 160 km/hr (Tabla II.1.2).

Tamaño del granizo	Diámetro		Velocidad de caída
	En Pulgadas	En milímetros	Km/hr
Chícharo	< 1/4	< 63.5	< 39
Pastilla	1/2	127	56
Moneda de diez centavos	7/10	178	61
Moneda de 50 centavos	1	254	79
Moneda de dos pesos	1 1/4	318	87
Nuez	1 1/2	381	97
Pelota de golf	1 3/4	445	103
Huevo de gallina	2	508	111
Pelota de tenis	2 1/2	635	124
Pelota de Beisbol	2 3/4	699	130
Taza de té	3	762	135
Toronja	4 1/2	1143	166

Tabla II.2 Velocidades aproximadas de caída del granizo (National Weather Service, s.f.)

II.1.2. PRESENCIA DE GRANIZO EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Instrumentos de medida

En marzo de 1877 se fundó el Observatorio Meteorológico Central en la Ciudad de México (Vidal y otros, 2007) dando inicio a la recopilación climatológica en el país, en consecuencia, actualmente el servicio Meteorológico Nacional (SMN) cuenta con más de 400 estaciones de servicio y junto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que son los organismos encargados de proporcionar información sobre el clima en nuestro país, han formado una red de centros meteorológicos (figura II.1.2.1) y centros hidrometeorológicos (figura II.1.2.2) a lo largo del país que permiten medir y dar seguimiento a fenómenos atmosféricos constituidos por agua, en forma de lluvia, granizo y nieve principalmente.

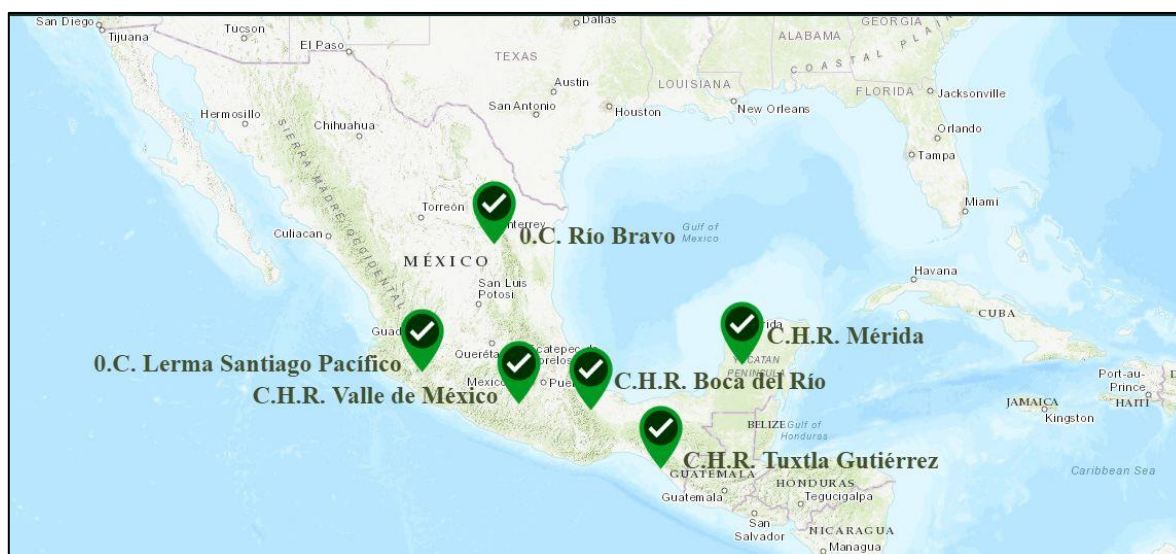


Fig. II.3 Centros meteorológicos operados por CONAGUA Y SMN (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2020)

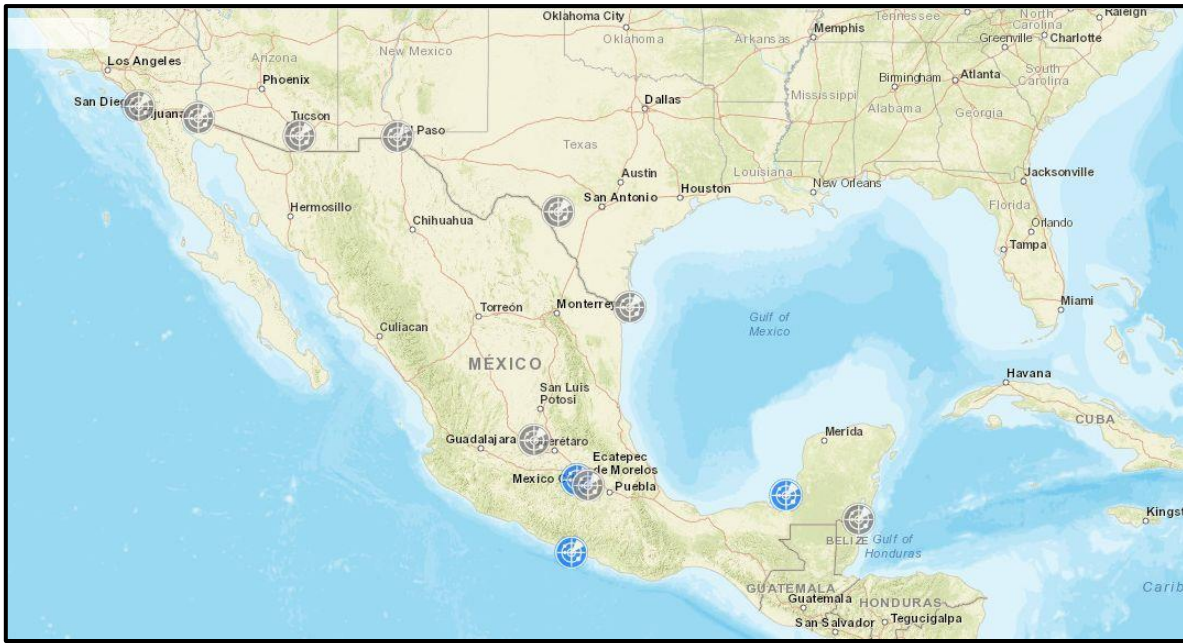


Fig. II.4 Radares hidrometeorológicos operados por CONAGUA Y SMN (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2020)

Estas herramientas nos permiten entre otras cosas el pronosticar las condiciones climatológicas, y almacenamiento de datos para futuras estadísticas y estudios.

Cantidades de granizo

En la República Mexicana se registran granizadas en la región del altiplano principalmente, así como en la Sierra Madre del Sur y algunas regiones de Chiapas, Guanajuato, Durango y Sonora. Las ciudades con mayor frecuencia son Puebla, Tlaxcala, Zacatecas, Ciudad de México, Jalisco y Pachuca.

Los recientes desastres naturales han estimulado la necesidad de generar bases de datos que permitan conocer el comportamiento de este fenómeno natural a lo largo del tiempo. Es importante destacar que, con la ayuda de la instrumentación antes mencionada, el Instituto de Geografía de la Universidad Autónoma de México ha generado mapas de la cantidad de granizo en todo el país en donde se clasifica por la suma de días con presencia de este fenómeno. Esto apoya para conocer más la zona estudio y acotar las variables que ayudarán al análisis y diseño estructural de los techos, así como la propuesta del drenaje para desalojar agua y hielo.

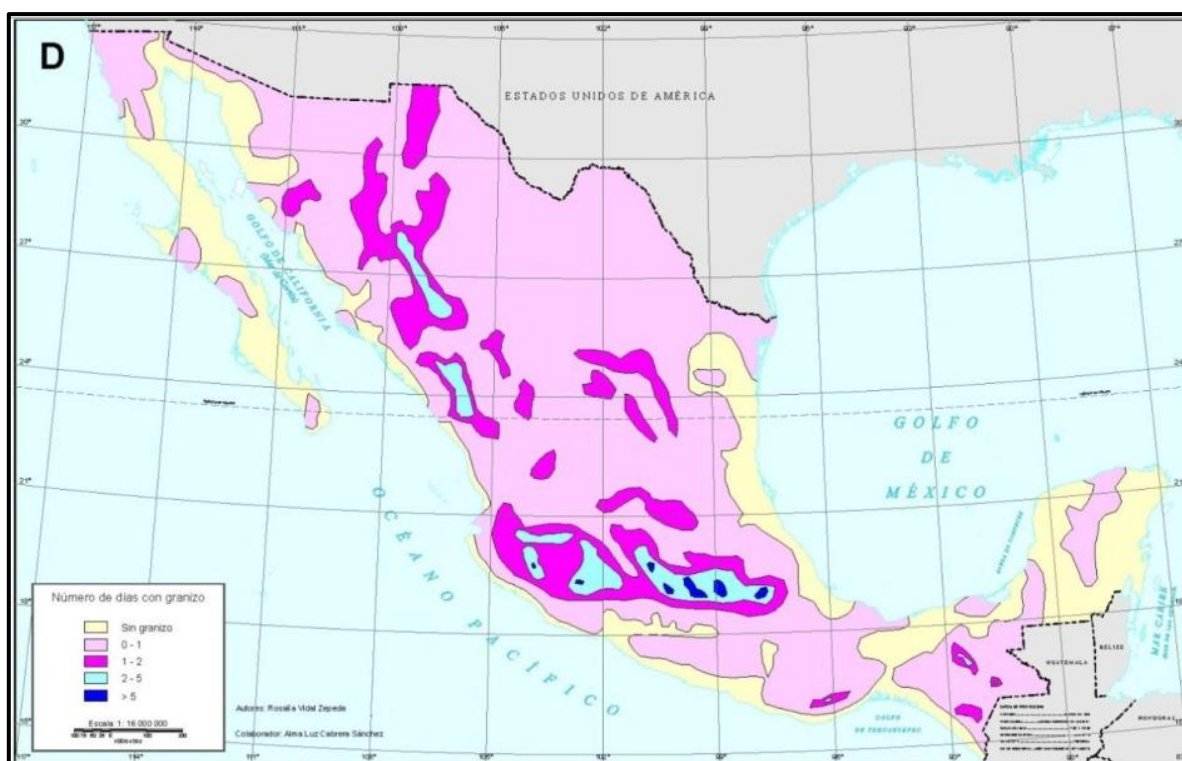


Fig. II.5 Número de días con granizo al año en la República Mexicana (CENAPRED, 2012)

Número de días con granizadas	Identificador
>5	
2-5	
1- 2	
0-1	
Sin granizo	

Tabla II.1.2.1 Número de días con granizo

Prolifera la preocupación de los innumerables daños que las granizadas traen consigo, sobre todo los deterioros materiales y gastos económicos que suelen ser altos. Durante los últimos años se ha trabajado en un índice del peligro por estados y municipios, concluyendo que sólo el 15% de los municipios en México tiene una alta exposición a granizadas. Como podemos observar en la figura II.6, se marcan

en color roja las zonas con más frecuencia de precipitaciones con granizo y por lo tanto son franjas de alto riesgo.

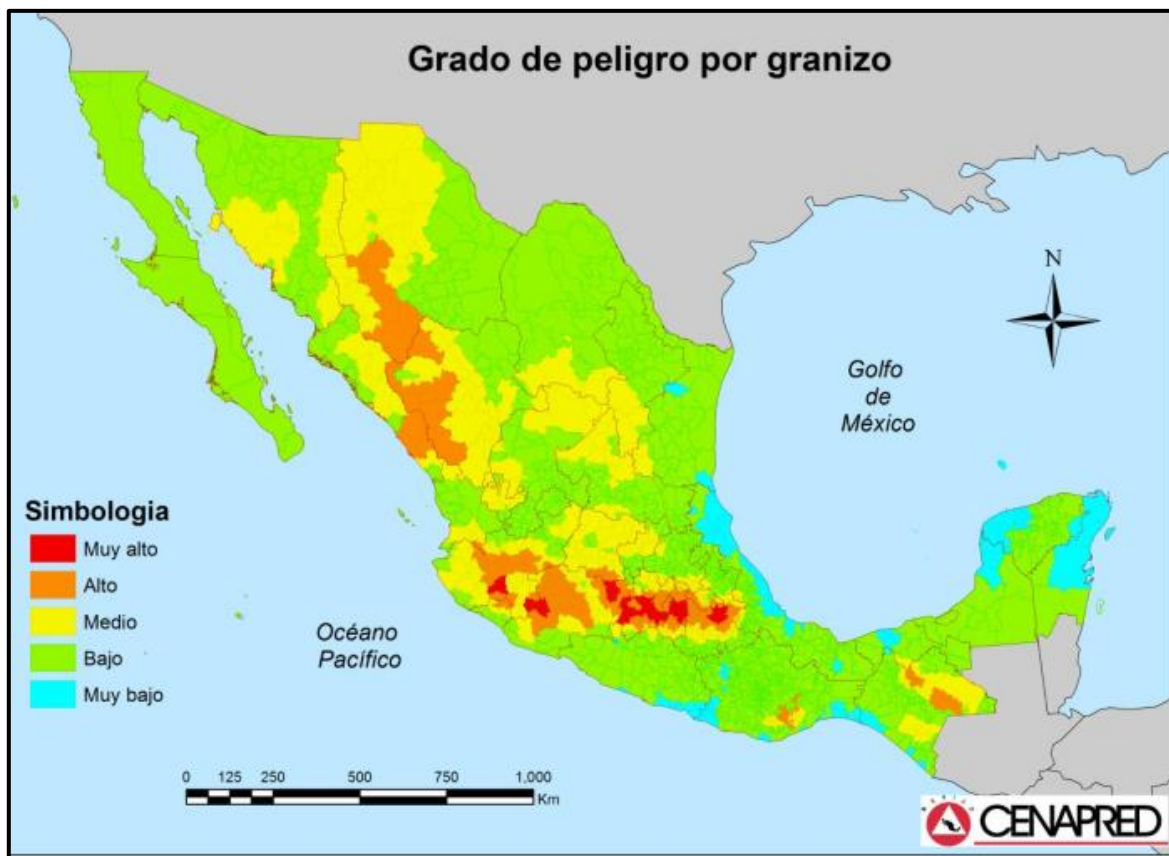


Fig. II.6 Índice de peligro por caída de granizo por municipio (CENAPRED, 2012)

En términos generales, la mayoría del territorio mexicano no presenta fenómenos extraordinarios como granizo o nevadas en comparación con otros países como el vecino Estados Unidos o Canadá donde la gente aprende a vivir con ello. Sin embargo, se debe tomar la importancia debida ya que cada vez las tormentas son más intensas y en ocasiones están fuera de la estadística, por estas razones, en la zona centro del país es donde se han registrado las mayores afectaciones en estructuras industriales y motivo de esta investigación que seguramente será pionera en la innovación de la construcción y seguridad estructural.

II.2. NAVES INDUSTRIALES

¿Qué es una nave industrial?

Una nave industrial es un edificio que se caracteriza por la gran área que abarca sin la necesidad de apoyos estructurales cercanos, logrando grandes espacios y resolviendo problemas de alojamiento y operación. Este tipo de construcciones se utilizan para realizar actividades relacionadas con la producción, transformación, manufactura, ensamble, procesos, almacenaje y distribución, trabajando así con mucha versatilidad.



Fig. II.7 Nave industrial en proceso de construcción (autoría propia, 2020)

Características principales

Desde los años 50 que inició la construcción de naves industriales en México han relucido sus grandes ventajas que, con el paso de los años cada vez son más notables, la rapidez en la construcción es de las más sobresalientes, el uso de elementos prefabricados facilita la elaboración y colocación de las piezas

estructurales apoyándose de maquinaria pesada. Actualmente un edificio de diez mil metros cuadrados se construye en ocho semanas.

Desde el punto de vista económico, el desarrollo de un proyecto de edificio industrial resulta muy rentable gracias a las diferentes soluciones estructurales que puede llegar a tener, los materiales que se usan y esencialmente por el techo. La estructura de una techumbre se fabrica con elementos de acero muy ligeros en comparación de los grandes claros que llegan a salvar. En relación con el párrafo anterior, el poco tiempo de construcción implica menor gasto en mano de obra y maquinaria, haciendo que el inversionista tenga un ahorro considerable, esto apoya en reducir el plazo de retorno de inversión.

En definitiva, son ventajas bastante competitivas ante otro tipo de edificaciones, razón por la cual existen a lo largo y ancho de la República Mexicana y su tasa de crecimiento va en aumento.

Materiales

En cuanto a los tipos de materiales que se utilizan para la construcción también se han innovado, en la actualidad el acero estructural y concreto reforzado son los dos principales pilares para la elaboración de los elementos que formarán el edificio. Es importante destacar que en una nave industrial el techo es 100% con estructura metálica, sin embargo, las columnas pueden ser de concreto reforzado gracias a los avances tecnológicos y de ingeniería ambos materiales pueden ser conectados y trabajar como si fuera uno solo.

La cimentación indudablemente se fabrica con concreto reforzado, pudiendo ser prefabricada o colada en sitio, para la estructura del techo se resuelve generalmente con marcos de alma llena o armaduras de perfiles pequeños sobre los cuales cargarán a los largueros y a su vez al sistema de lámina elegido.

Tipos de techos

La arquitectura juega un papel importante en las naves industriales. Resolver un techo implica también que el producto final luzca, ya sea como estrategia de venta o cubrir elementos de la propia cubierta. Existen techumbres a un agua, a dos aguas, circulares, del tipo diente de sierra. Cada geometría conlleva a una solución distinta en el funcionamiento del drenaje pluvial, en este sentido, se genera un problema con la presencia del granizo, los constructores generalmente resuelven de una sola manera el desagüe, cuando para cada caso debería de existir una solución.

II.2.1 NAVES INDUSTRIALES EN MÉXICO Y SU CONSTRUCCIÓN EL FUTURO

Desde los años 60 la construcción de naves industriales en México ha resultado ser un referente en la economía local, ha sido, además, un factor importante para atraer empresas multinacionales que buscan colocar sus productos en nuestros mercados. Una de las ventajas competitivas con otros países es la misma ubicación, lo que es atractivo para muchos inversionistas europeos. La cercanía con Estados Unidos y Canadá representa una gran oportunidad para grandes negocios de producir a costos bajos y exportar posteriormente.

México ha sido capaz de cimentar una buena cadena productiva a lo largo del territorio formando parques industriales que cumplen con todas las necesidades y estándares de calidad para los más exigentes, los cuales, a su vez, cuentan con mano de obra especializada.

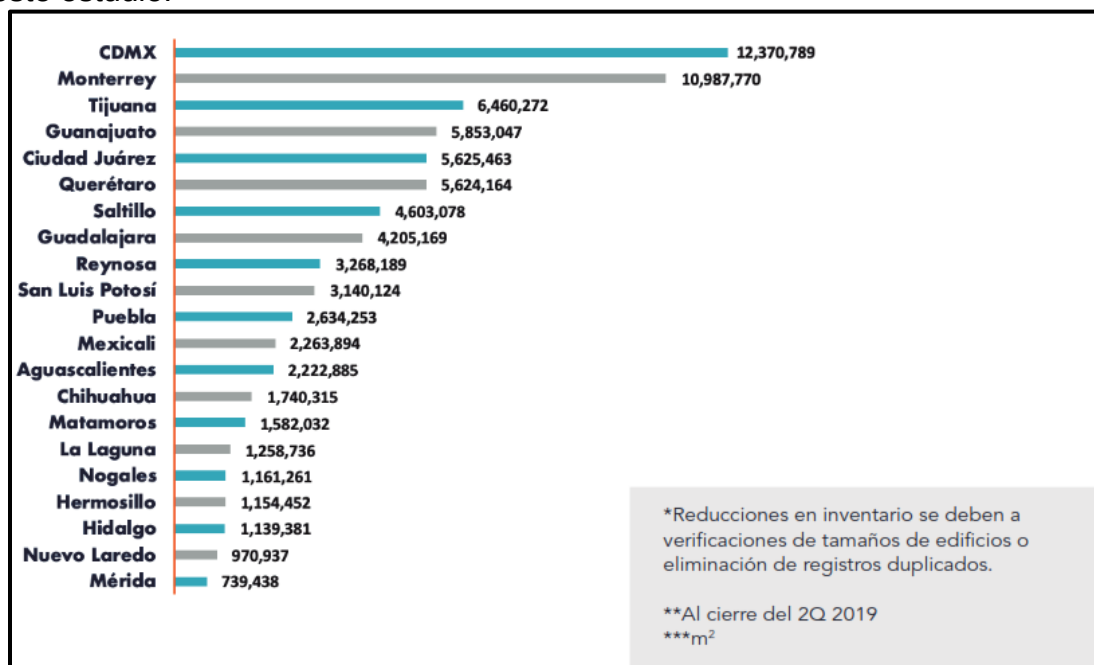
Como consecuencia, las naves industriales son y seguirán siendo, una de las estructuras con mayor demanda en todo el territorio mexicano, por ello, cada vez más observamos que se construyen con frecuencia y los inversionistas se inclinan por esta solución para sus negocios.

Los parques industriales son un motor de la economía del país donde se benefician dos partes, los inversionistas al recuperar en corto plazo la inversión y los sectores

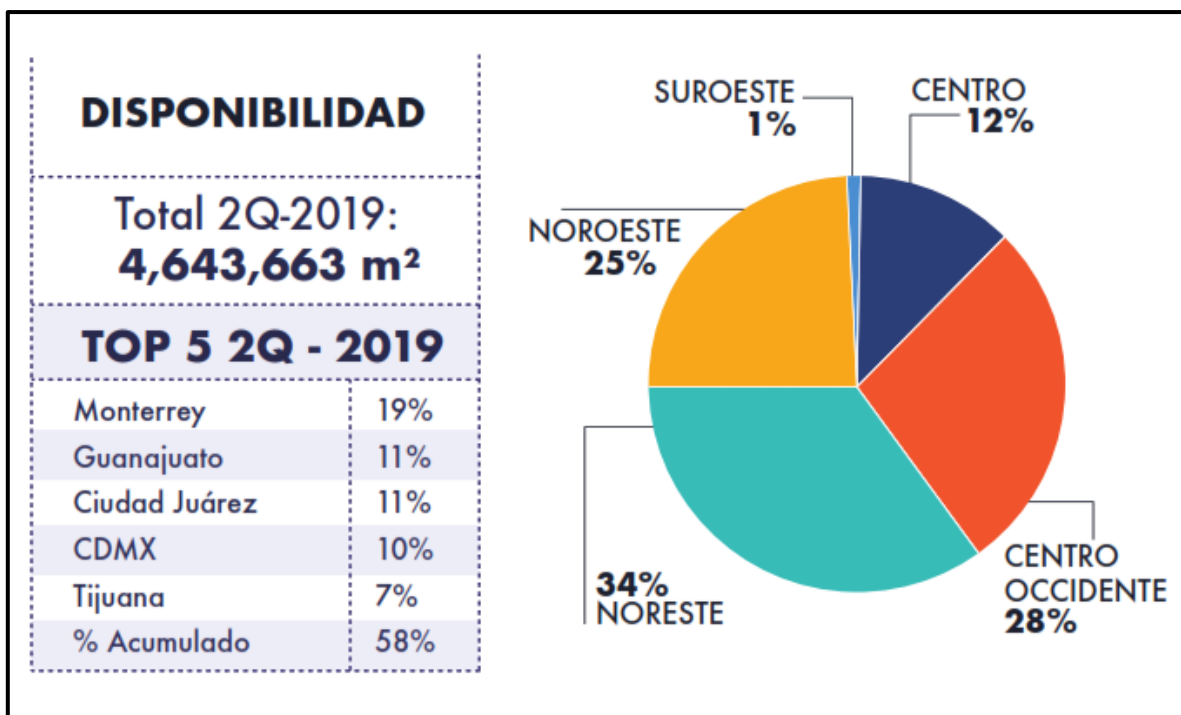
poblacionales al generarse nuevos empleos. La construcción o edificios industriales en México tuvo un aumento del 3.5% durante el 2019 respecto al 2018 (Plataforma inmobiliaria Datoz, 2020) al registrar cerca de 2.3 millones de metros cuadrados de área neta rentable.

Panorama del mercado inmobiliario industrial

La Asociación Mexicana de Parques Industriales Privados (AMPIP) representa a más de 250 parques industriales, ubicados en 25 estados de la República, los cuales suman alrededor de 35 millones de metros cuadrados en construcción. Dentro de esos parques están instaladas más de 2500 empresas de manufactura y logística, en donde laboran más de 2 millones de personas (Inmobiliare Magazine, 2020). El organismo proporciona una considerable cantidad de información sobre el panorama de la industria en nuestro país como el inventario actual (gráfico II.1.2.1) y el espacio disponible para construcción (gráfico II.1.2.2). De este modo, es fácil deducir la tendencia en la construcción de este tipo de inmuebles y la factibilidad de este estudio.



Graf. II.8 Inventario actual de metros cuadrados construidos (A.C., 2019)



Graf. II.9 Área disponible para construcción en las 5 zona del país (A.C, 2019)

Las investigaciones han demostrado que el granizo es un fenómeno que estará siempre presente, no sabemos con qué intensidad caerá cada día, pero si conocemos que pueden presentarse grandes cantidades de hielo en una sola lluvia. En lo que compete a naves industriales, el futuro es prometedor para su construcción y cada vez se busca abarcar más área en un solo edificio debido a que las empresas necesitan más producción, adquieren maquinaria de última generación y por lo tanto más personal y poco a poco el uso de la robótica también significa un parteaguas para la innovación.

En definitiva, lo que no cambiará de un techo industrial es que está formado por estructura metálica ligera y algún tipo de lámina, que puede ser galvanizada, paneles, con algún aislante térmico o acústico y la nueva tendencia que son los techos verdes, de esta manera existe una relación importante en cómo trabajar en conjunto ambas variables, que hasta la fecha ha habido escasa importancia y únicamente se limita a propuestas de solución mayormente sin un sustento numérico.

II.3. DAÑOS EN TECHOS EDIFICIOS INDUSTRIALES A CAUSA DEL GRANIZO

La vulnerabilidad de las estructuras industriales ante el granizo no es un tema nuevo y es más común de lo que parece, las principales causas de daño son por:

- a) El impacto producido por el propio granizo
- b) Acumulación del hielo en los techos

Por lo general, la estructura es capaz de soportar la fuerza de impacto de las gotas congeladas que caen a velocidades ya antes vistas, en particular, la lámina es la que sufre los daños, desde abolladuras hasta la penetración y ruptura. Por otro lado, la acumulación del granizo provoca una inestabilidad de la estructura, lo que puede desencadenar la flexión de elementos estructurales o el colapso de esta. En México, particularmente en el estado de Puebla, se han reportado muchas estructuras con muchos daños debidos a tormentas de granizo (Ruiz, 1999).

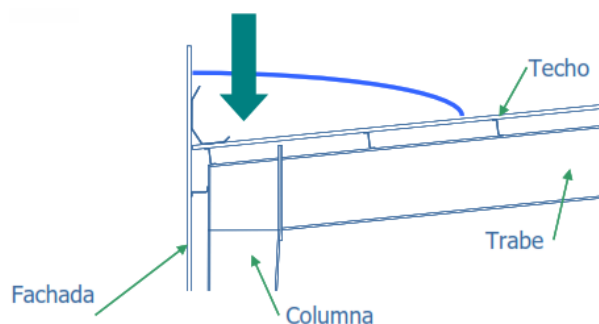


Fig. II.10 Representación de la acumulación del granizo en naves industriales (Cabrera, Efecto del granizo en estructuras y modelos de estimación de daños, 2006)

Bodegas	3,500	Colapso	Santa Ana, Tlax.	1967
Textilera	3,000	Colapso	Covadonga, Tlax.	1981
Fábrica de zapatos	4,000	Colapso	San Martín, Tex.	1981
Bodegas de Bugambilias	3,000	Daño	Puebla, Pue.	1987
Naves industriales	2,500	Colapso	Puebla, Pue.	1987
Agencia Cervecera	2,000	Colapso	Lara Grajales, Pue.	1990
Empacadora	14,000	Colapso	Lara Grajales, Pue.	1990
Procesadora de malta	5,000	Colapso	Lara Grajales, Pue.	1990
Fábrica Textil	ND	Colapso	Apizaco, Tlax.	1995
Fábrica Textil	ND	Colapso	Apizaco, Tlax.	1995
Refresquera	2,000	Colapso	Apizaco, Tlax.	1996
Tienda de Artesanías	1,000	Colapso	Tecali, Pue.	1997
Maquiladora de Ropa	1,600	Colapso	Tepeaca, Pue.	1999

Tabla II.2 Daños causados por tormentas de granizo en Tlaxcala y Puebla entre 1967 y 1999 (Cabrera, EFECTO DEL GRANIZO EN ESTRUCTURAS Y MODELOS DE ESTIMACIÓN DE DAÑOS, 2006)

La cantidad de los daños y sus tipos dependen principalmente de la cantidad y tamaño del granizo, con base a los reportes periodísticos y registros de los ciudadanos, se ha generado la siguiente tabla de datos con información importante que permite conocer las afectaciones en techos industriales.

Fecha	Lugar de afectación	Comentarios y/o daños
Agosto 27 de 1976	Distrito Federal (zona poniente)	La tormenta duró 17 minutos y dejó una capa de granizo de 24 cm hubo 12 muertos e inundaciones, 26 personas lesionadas y 300 quedaron sin hogar. Varias vecindades en Tacubaya fueron dañadas y algunas se colapsaron por las malas condiciones en que se encontraban. El mercado de Las Américas en Tacubaya, sufrió el desplome de su techo. Otras estructuras en Mixcoac y Villa Obregón tuvieron la misma suerte. El metro paró sus actividades, hubo caos vial y la corriente eléctrica se cortó en la parte occidental de la ciudad.
Junio 29 de 1994	Tlaxcala: Aueyotlipan	Fueron afectadas 500 ha de cultivo de maíz, trigo y cebada a causa de la granizada. El granizo llegó a tener 20 cm de espesor y provocó inundaciones.
Mayo 3 de 1994	Hidalgo: Tula, Almoloya	Destruyó los techos de 60 hogares en Almoloya, además afectó 788 ha de cultivo en Tula, fueron afectados 500 ejidatarios. El granizo alcanzó 40 cm de espesor.
Mayo 7 de 1996	Estado de México: Calpulalpan	Causó el derrumbe del techo de dos naves industriales y la inundación de varias casas. La granizada duró 60 minutos.
Marzo 31 de 1998	Baja California: Tijuana	La granizada afectó la parte este de la ciudad en donde dejó una capa de hasta 15 cm de espesor, además causó daños materiales.
Julio 23 de 2000	Michoacán: Zamora	En las zonas urbana y suburbana de Zamora quedaron destruidas unas 60 viviendas de lámina de cartón.
18 abril 2001	Zacatecas: Zacatecas, Guadalupe, Fresnillo	Un muerto, dos personas heridas y daños en 100 casas fue el saldo de la granizada.
Mayo 7 de 2001	Coahuila: Allende, Villa Unión	La granizada dejó daños en cientos de casas y comercios. Un tramo de la carretera México-Piedras Negras fue cerrado a la circulación, al inundarse la cinta asfáltica. También se registraron daños considerables en tuberías de gas doméstico, agua potable y líneas conductoras de energía eléctrica.
Agosto 13 de 2003	Estado de México: Amecameca	Una intensa granizada que duró de 20 a 30 minutos causó daños a 97 casas, debido al peso del granizo se desplomaron algunos techos, se rompieron tejados y algunas bardas resultaron seriamente afectadas. La capa de granizo tuvo un espesor de entre 30 y 40 cm.
Abril 23 de 2004	Veracruz: Orizaba	La granizada destruyó el domo de la Plaza de Toros La Concordia.
Mayo 24 de 2005	Tlaxcala: Altzayanca	La granizada acabó con el 59% de la producción local de durazno, que oscila entre 800 y 1,000 ha.
Agosto 31 de 2005	Hidalgo: Tulancingo, Omitlán de Juárez	La granizada ocasionó pérdidas en 24 viviendas, cuatro de ellas con daños estructurales.
Mayo 10 de 2006	Coahuila: Candela	El granizo del tamaño de un limón, cayó en la localidad provocando severos daños principalmente en huertas nogaleras y cultivos de forraje.
Junio 23 de 2006	Hidalgo: Cuauhtepic, Tezontepec de Aldama	La intensa granizada que tuvo una duración de más de una hora, y que alcanzó 30 cm de altura en algunas partes y afectó más de 300 ha de cultivos de chile, calabaza y maíz.
Junio 5 de 2008	Tabasco: Huimanguillo	El granizo destruyó los techos de al menos 20 casas en Huimanguillo, además de tirar árboles y bardas.
Junio 16 de 2008	Jalisco: Tlaquepaque	Las precipitaciones registraron vientos con rachas de 69 kilómetros por hora y caída de granizo, varias viviendas se colapsaron, por lo que algunas familias lo perdieron todo. El granizo dejó al menos nueve lesionados y cobró la vida de un niño de apenas un año y medio de edad, esto luego que la barda de su vivienda se colapsara.

Tabla. II.3 Granizadas que han afectado a la República Mexicana (Desastres C. N., 2019)

El impacto del granizo en las naves industriales no es fácil de determinar, no obstante, el objetivo de este estudio es aportar elementos que ayuden a prevenir daños severos o mejor aún, no tener afectaciones. Las pérdidas económicas no están registradas en las tablas anteriores, sin dudar son números fuertes, sumado a ello la suspensión de la producción, cada día que no trabajado son miles de pesos no generados que afectan a todas las familias de los empleados de la industria perjudicada.

II.4. NORMATIVA ACTUAL

Las Normas Técnicas Complementarias 2017, publicado por el Diario Oficial de la Federación en diciembre de 2017 únicamente dan dos recomendaciones para considerar un peso por sobrecarga de granizo (Figura II.11). Se considera que la información es limitada y que las cargas recomendadas pudieran estar escasas.

⁸ Además, en el fondo de los valles de techos inclinados se considerará una carga debida al granizo de 0.3 kN (30 kg) por cada metro cuadrado de proyección horizontal del techo que desagüe hacia el valle. Esta carga se considerará como una acción accidental para fines de revisión de la seguridad y se le aplicarán los factores de carga correspondientes según la sección 3.4.

⁹ Para tomar en cuenta el efecto de granizo, W_m se tomará igual a 1.0 kN/m^2 (100 kg/m^2) y se tratará como una carga accidental para fines de calcular los factores de carga de acuerdo con lo establecido en la sección 3.4. Esta carga no es aditiva a la que se menciona en el inciso i) y en la Nota 8.

Fig. II.11 Cargas a considerar por granizo (México, 2017)

En la República Mexicana no existe otra normativa que mencione cómo trabajar con granizo, los códigos municipales basan sus recomendaciones en estas normas. Surge, por lo tanto, la necesidad de profundizar el tema con el objeto de generar nuevas referencias de diseño y cálculo estructural que conlleven a un buen funcionamiento del edificio industrial y la seguridad tanto estructural como para el usuario.

En resumen, las naves industriales y el granizo han tenido mucha historia juntos y la tendencia indica que ambos estarán presentes en un futuro. El cambio climático traerá consigo fenómenos naturales fuera de lo común y se debe estar preparado para ello.

En cuanto al funcionamiento del drenaje de las naves industriales se ha optado desde siempre por un canalón en la parte más baja del techo y bajadas pluviales que pueden ser de lámina o PVC, funcionan, pero ya vimos que no es suficiente. Es verdad que cada edificio tiene sus propias características de forma, ubicación, colindancias y no se debe tomar las mismas medidas de soluciones para cada caso, pero si se puede hacer recomendaciones que lleguen a estar cercanas a la problemática.

El actual entendimiento de las cargas que el granizo puede presentar en los techos es limitado, no se ha profundizado como el tema del viento o sismo que también afectan a los mismos edificios, seguramente porque la presencia en la República Mexicana es pequeña en comparación de los demás factores, a pesar de todo, surge la necesidad de analizar y proponer soluciones estructurales y de funcionamiento que permitan anular o reducir los gastos de daños, salvaguardando el patrimonio bajo cada techo, la economía y la vida de quienes lo utilizan.

En cuanto a las naves industriales, es necesario que se considere en su diseño las medidas adecuadas para obtener un buen servicio aún con una sobrecarga de hielo en caso de obstrucción del mecanismo de desagüe, mismas que estaremos proponiendo y analizando en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE ACUMULACIÓN DE GRANIZO EN DIFERENTES TIPOS DE CUBIERTAS

Conocer qué tanto granizo puede acumularse en un techo de gran importancia y utilidad para elegir una solución estructural, ya que esta información engloba desde el procedimiento de análisis, revisiones por realizar y materiales con los cuales será fabricada la nave industrial. Actualmente las Normas Técnicas Complementarias NTC-2017 recomiendan tomar una densidad de 100 kg/m^2 en un cuarto del valle del agua como carga por granizo, pero ¿es suficiente este peso? ¿el área de análisis cubre todas las pendientes de los techos y sus características?

III.1. CONSIDERACIONES POR OTROS REGLAMENTOS

En el capítulo anterior se comentó que no hay información suficiente para considerar la carga de granizo y en las normas actuales para nuestro país únicamente hay un par de recomendaciones, derivado a ello, se realizó una búsqueda en los reglamentos de otros países para conocer sus consideraciones al respecto. De la figura III.1 hasta la figura III.7 se muestran los lineamientos que toman en otras partes del mundo:

3.2.5. Cargas de granizo

Se considerará una acumulación del granizo en corto tiempo.

Se debe tomar en cuenta para regiones del país con más de 1500 msnm, las cargas de granizo **S**, tal como se especifica en los siguientes párrafos.

La carga de granizo **S** se determinará por la siguiente formulación:

$$S = \rho_g \cdot H_g$$

Dónde:

ρ_g Peso específico del granizo (en defecto: 1000 Kg/m³)

H_g Altura de acumulación (m)

Para cubiertas con pendientes menores del 15%

Se debe considerar una carga de granizo mínima de 0.50 kN/m²

Para cubiertas con pendientes menores del 5%

Se debe considerar una carga de granizo mínima de 1.0 kN/m²

En los sitios donde sea necesario considerar la carga de granizo, se adicionará una sobrecarga de 1.0 kN/m² en las áreas de los aleros, en un ancho del 10% de la luz libre, medido desde el borde hacia el apoyo y no menor a 1000 mm.

Fig. III.1 Cargas para granizo según la norma ecuatoriana (Norma Ecuatoriana, 2015)

B.4.8.3 — CARGA DE GRANIZO

B.4.8.3.1 — Las cargas de granizo, **G**, deben tenerse en cuenta en las regiones del país con más de 2 000 metros de altura sobre el nivel del mar o en lugares de menor altura donde la autoridad municipal o distrital así lo exija.

B.4.8.3.2 — En los municipios y distritos donde la carga de granizo deba tenerse en cuenta, su valor es de 1.0 kN/m² (100 kgf/m²). Para cubiertas con una inclinación mayor a 15° este valor puede reducirse a 0.5 kN/m² (50 kgf/m²).

Fig. III.2 Cargas de granizo según la norma colombiana NSR-10 – Título B (NRS-10, 2010)

La norma peruana no habla directamente del granizo, pero sí de cargas que deben considerarse para nieve y que sin duda son referencia importante. En la norma encuentran recomendaciones del peso en función del grado de inclinación del techo:

a)	Para techos a una o dos aguas con inclinaciones menores o iguales a 15° (pendiente ≤ 27%) y para techos curvos con una relación flecha/luz ≤ 0,1 o ángulo vertical menor o igual a 10° (calculado desde el borde hasta el centro) la carga de diseño (Q_t), sobre la proyección horizontal, será:
	$Q_t = Q_s$
b)	Para techos a una o dos aguas con inclinaciones comprendidas entre 15° y 30° la carga de diseño (Q_t), sobre la proyección horizontal, será:
	$Q_t = 0,80 Q_s$
c)	Para techos a una o dos aguas con inclinaciones mayores que 30° la carga de diseño (Q_t), sobre la proyección horizontal, será:
	$Q_t = C_s (0,80 Q_s) \text{ donde } C_s = 1 - 0,0025(\theta^\circ - 30^\circ),$ siendo C_s un factor adimensional.

Fig. III.3 Cargas de granizo según la norma peruana (E.020, 2016)

De igual manera, el reglamento argentino y la norma americana ASCE 7-10 proponen que la carga de nieve sea considerada en función de la pendiente de la cubierta:

A los fines de este Reglamento se supone que las cargas de nieve que actúan sobre una superficie con pendiente lo hacen sobre la proyección horizontal de esa superficie. La carga de nieve sobre una cubierta con pendiente, p_s , se obtiene multiplicando la carga de nieve sobre la cubierta plana, p_f , por el factor de pendiente de la cubierta, C_s :
$p_s = C_s p_f \quad [\text{kN/m}^2] \quad (2)$

FACTOR DE PENDIENTE PARA CUBIERTAS CURVAS

Aquellas partes de las cubiertas curvas que presenten una pendiente > 70° se deben considerar libres de la aplicación de la carga de nieve (por ejemplo $C_s = 0$).

Las cargas balanceadas se deben determinar a partir de los diagramas de cargas balanceadas especificados en la Figura 3, con el valor del coeficiente C_s , obtenido de la curva correspondiente de la Figura 2.

FACTOR DE PENDIENTE PARA CUBIERTAS DE PLACAS CON PLEGADO MÚLTIPLE, DIENTE DE SIERRA Y BÓVEDAS CILÍNDRICAS

Las cubiertas constituidas por placas con plegado múltiple, diente de sierra, o bóvedas cilíndricas continuas deben tener un coeficiente $C_s = 1,0$, sin reducción en la carga de nieve debido a la pendiente (por ejemplo $p_s = p_f$).

CARGAS DE NIEVE NO BALANCEADAS SOBRE CUBIERTAS A DOS Y CUATRO AGUAS

Para cubiertas a dos y cuatro aguas con pendiente $> 70^\circ$ o con pendiente menor que $[(21/W) + 0,5]$, con W en m, no es necesario aplicar las cargas de nieve no balanceadas.

Para cubiertas con una distancia desde la cumbrera hasta el borde exterior del alero, $W \leq 6$ m, la estructura se debe diseñar para resistir una carga de nieve uniforme no balanceada sobre el lado a sotavento igual a:

$$1,5p_s/C_e$$

Para cubiertas con $W > 6$ m la estructura se debe diseñar para resistir una carga de nieve uniforme no balanceada sobre el lado a sotavento igual a:

$$1,2 [1 + (\beta/2)] p_s / C_e$$

siendo:

β parámetro de la nieve acumulada por arrastre del viento para cubiertas a dos aguas que se obtiene de la expresión (3)

$\beta = 1,0$	para	$p_g \leq 1 \text{ kN/m}^2$	
$\beta = 1,5 - 0,5 p_g$	para	$1 < p_g < 2 \text{ kN/m}^2$	(3)
$\beta = 0,5$	para	$p_g \geq 2 \text{ kN/m}^2$	

Fig. III.4 Consideraciones de cargas de nieve
para diferentes pendientes (ASCE 7, 2010)

CARGAS DE NIEVE NO BALANCEADAS SOBRE CUBIERTAS DE PLACAS CON PLEGADO MÚLTIPLE, DIENTE DE SIERRA, Y BÓVEDAS CILÍNDRICAS

Las cargas no balanceadas se deben aplicar a cubiertas de placas con plegado múltiple, dientes de sierra, y bóvedas cilíndricas con una pendiente $> 1,8^\circ$.

Para este tipo de cubiertas, el coeficiente $C_s = 1,0$, de acuerdo con el artículo 4.4., y la carga de nieve balanceada es igual a p_f .

La carga de nieve no balanceada se debe incrementar desde **0,5** de la carga balanceada en la cumbre, (o sea $0,5 p_f$) hasta **2 veces** la carga balanceada especificada en el artículo 4.4. dividida por el coeficiente C_e en el valle, (o sea $2 p_f / C_e$).

CARGAS DE NIEVE NO BALANCEADAS SOBRE CUBIERTAS CURVAS

Aquellas partes de las cubiertas curvas que presenten una pendiente $> 70^\circ$ se deben considerar libres de la acción de la carga de nieve.

Las cargas de nieve no balanceadas no se deberán considerar cuando la pendiente de una línea recta desde los aleros (o desde el punto de 70° , en caso de existir) hasta la cumbre, sea $< 10^\circ$ ó $> 60^\circ$.

Fig. III.5 Consideraciones de cargas de nieve
para diferentes pendientes (ASCE 7, 2010)

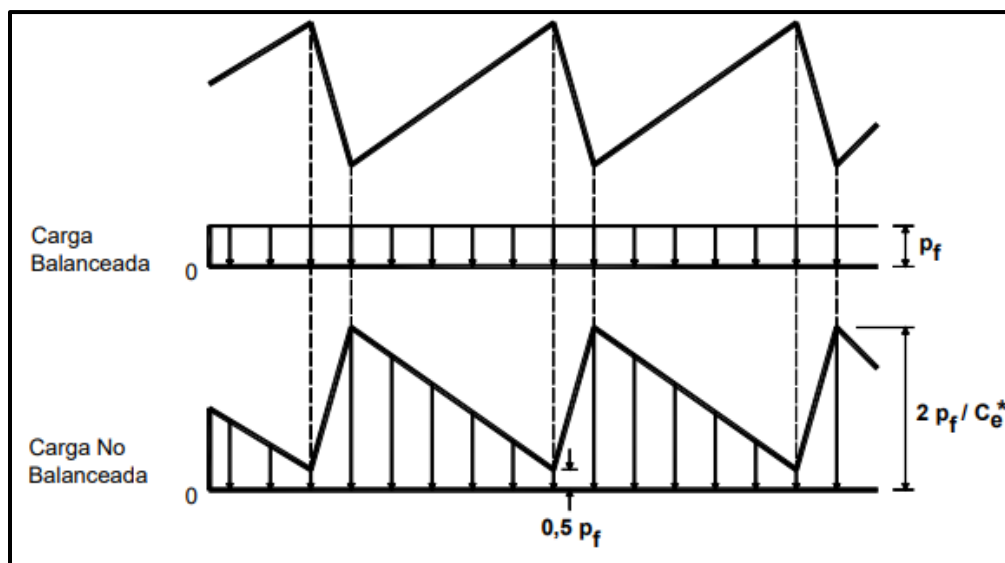


Fig. III.6 Cargas de nieve en un techo tipo
diente de sierra (ASCE 7, 2010)

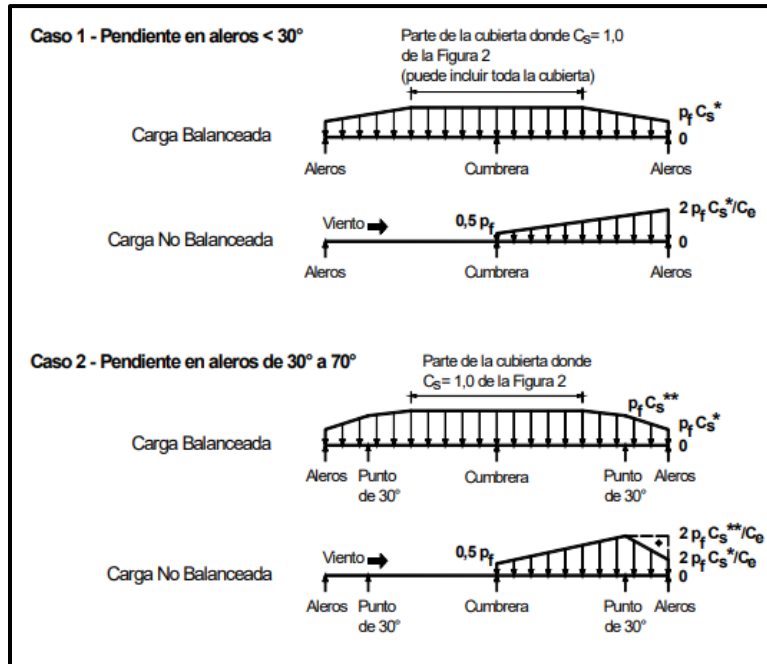


Fig. III.7 Cargas de nieve en un techo a cuatro aguas o más (ASCE 7, 2010)

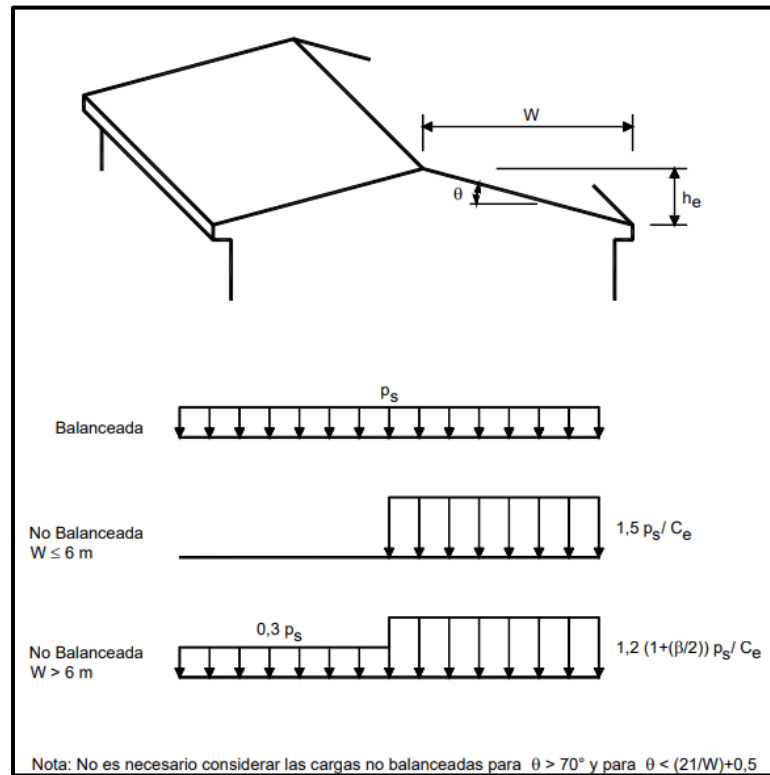
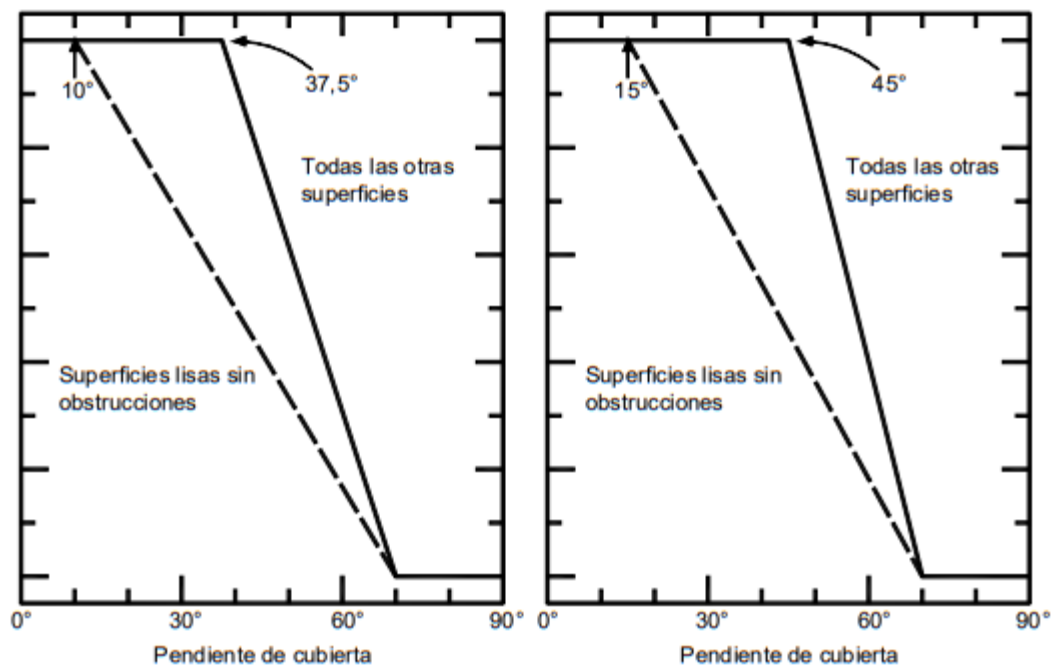
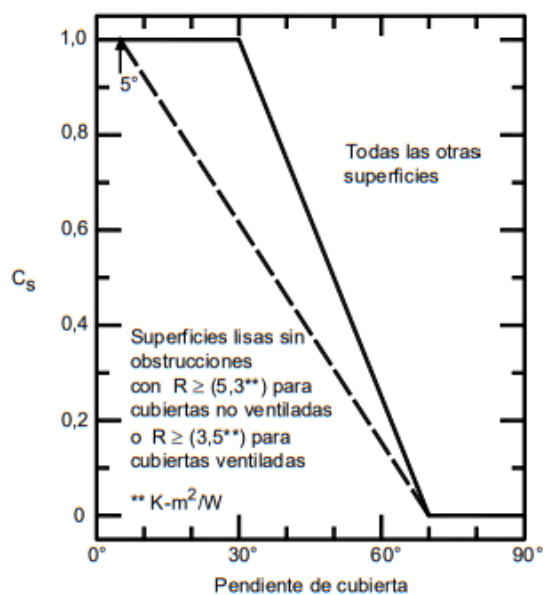


Fig. III.8 Cargas de nieve en un techo a dos aguas (ASCE 7, 2010)



2b) Cubiertas frías con $C_1 = 1,1$

2c) Cubiertas frías con $C_1 = 1,2$



2a) Cubiertas cálidas con $C_1 < 1,0$

Fig. III.9 Curvas para determinar el factor de pendiente (ASCE 7, 2010)

Con base a las consideraciones de los reglamentos anteriores y a unos más europeos, se propone que para pendientes menores a 5° el granizo se considere como una sobrecarga en todo lo largo de la cubierta y con un espesor de 15 cm como mínimo, por otro lado, para pendientes mayores a 5° el peso será afectado por un coeficiente que dependerá del grado de inclinación de la cubierta.

En la figura III.1.9 se observa el método de obtención del coeficiente de pendiente que reducirá la carga según el grado de inclinación de esta. Se hace una propuesta (línea color azul) indicando que para pendientes mayores a 25° el granizo resbala totalmente del techo y no existe acumulación, sin embargo, con forme la pendiente es menor, la carga a considerar será diferente a cero.

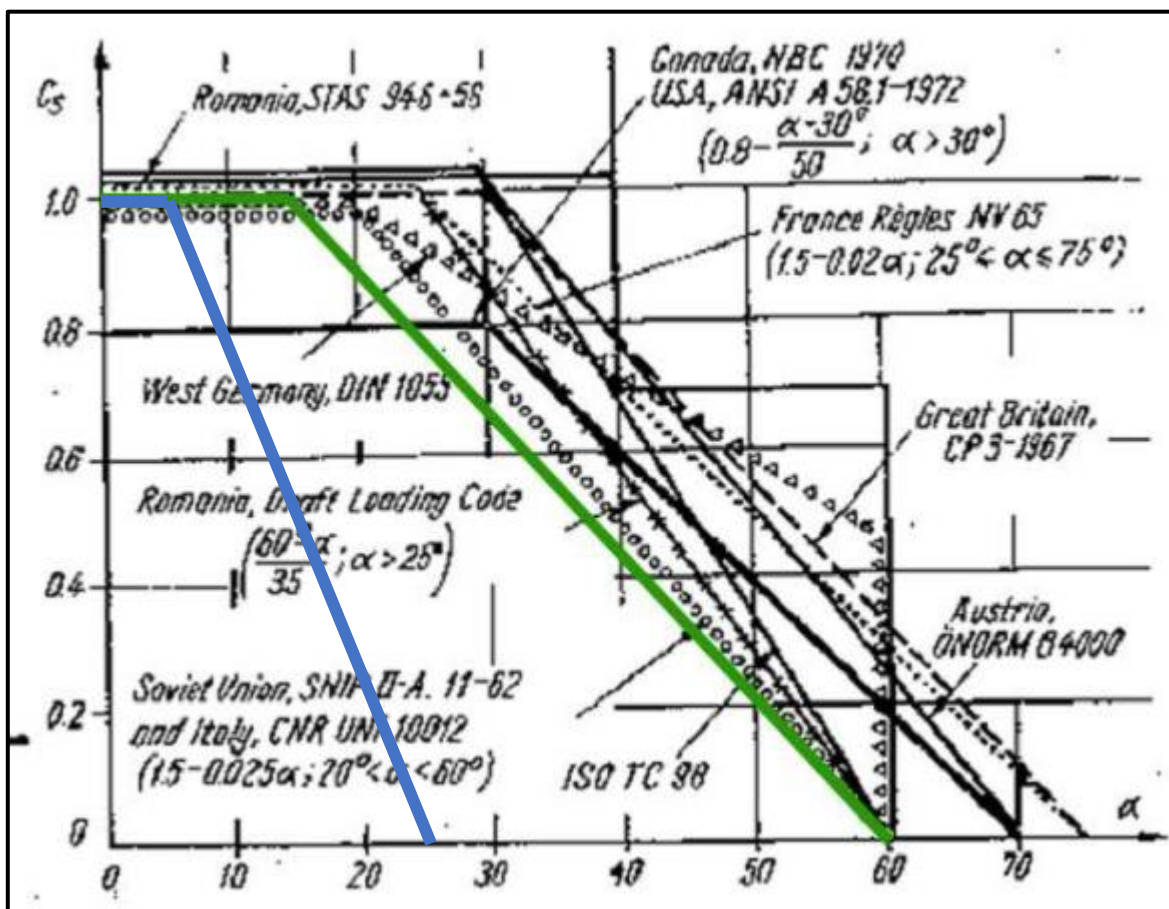


Fig. III.10 Cargas para nieve y granizo según varios reglamentos y propuesta (línea azul) (Zambrana, 2018)

III.2. ANÁLISIS DE ACUMULACIÓN DE GRANIZO PARA TECHOS DE PENDIENTE CONSTANTE

Los techos a una de un agua o más son configuraciones muy frecuentes en techos industriales, la pendiente asignada a cada uno dependerá inicialmente de las necesidades de alturas mínimas y máximas solicitadas por el cliente que siempre va de la mano con la vista arquitectónica final. El número de caídas dependerá de la solución estructural que a su vez dependen de la geometría en planta y ubicación de apoyos, colindancias, maniobras internas en la nave, entre otros aspectos, siempre buscando la solución a problemas de funcionalidad en los procesos internos de la empresa.

Con base a las propuestas que realizan otros países para considerar la carga de granizo, se propone obtener un coeficiente para determinar el porcentaje de acumulación dependiendo el ángulo de inclinación del techo, con la finalidad de conocer qué longitud de la cubierta deberá de revisarse por una sobrecarga.

Por observación de los diferentes techos que han fallado por sobrecarga de granizo, la gran mayoría contaba con un pendiente menor a 15° de inclinación, ángulo que geométrica y visualmente permite que los elementos que caigan en la cubierta, ya sean líquidos o sólidos, puedan permanecer sobre ella.

Para tener una mejor comparativa de los diferentes ángulos de inclinación, se realizó el siguiente esquema:

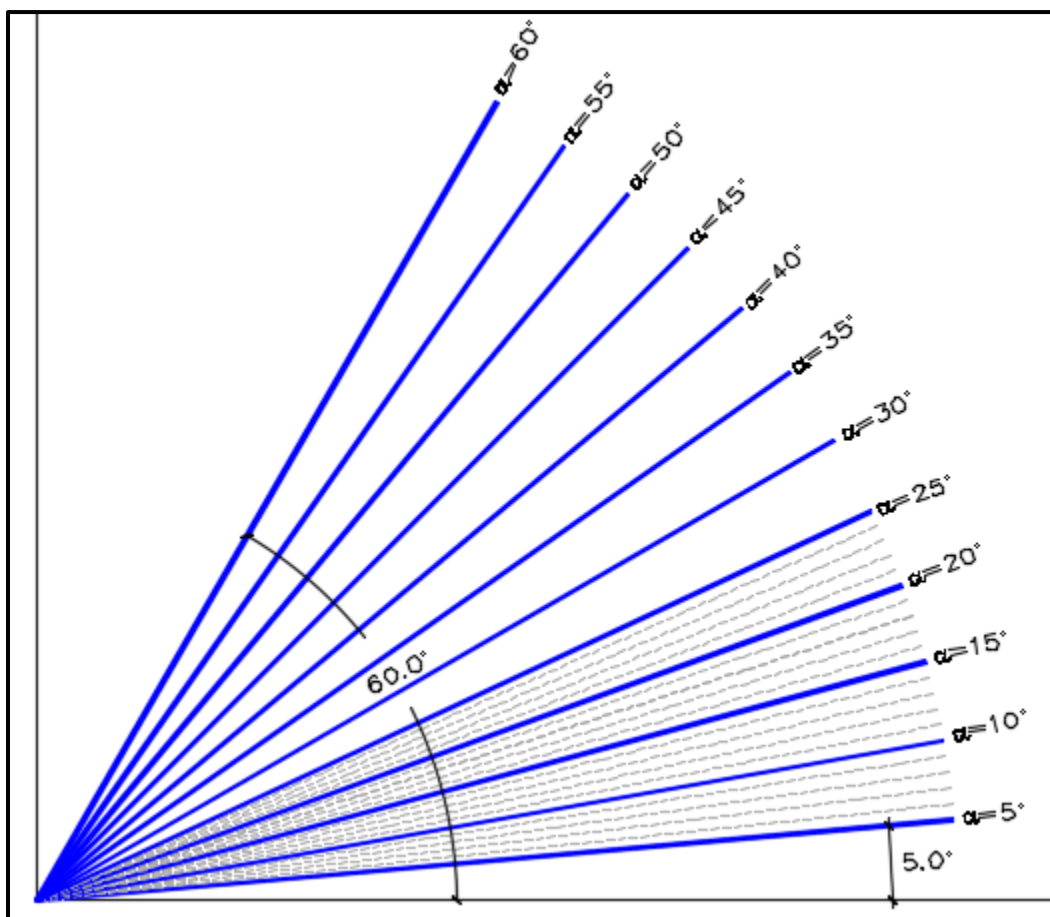


Fig. III.11 Comparativa de diferentes ángulos de inclinación de techos (autoría propia, 2021)

Visualmente un techo inclinado a más de 25° tiene una pendiente que no permitiría la acumulación de agua o granizo ya que resbalarían fácilmente en toda su longitud siempre y cuando al final del techo no se encuentre un obstáculo que provoque la retención de los materiales como son los faldones rectos.

Para tener una justificación matemática de la inclinación máxima donde ya no es factible la acumulación de agua o granizo, se realizó el cálculo de la velocidad que tomaría el agua para las diferentes pendientes, consiguiendo así, una herramienta adicional que justifique esta propuesta. Para ello se usarán las expresiones expuestas por Manning donde hace uso de un coeficiente de rugosidad, la pendiente de inclinación y un radio hidráulico que depende de la sección geométrica que transporta el líquido.

Se decide hacer el ejercicio tomando en cuenta una de las láminas más usadas en techos de estructura ligera, la lámina galvanizada y acanalada tipo R-101, este tipo de lámina se coloca en el 90% de los proyectos por economía, fácil de colocar y variedad de calibres.

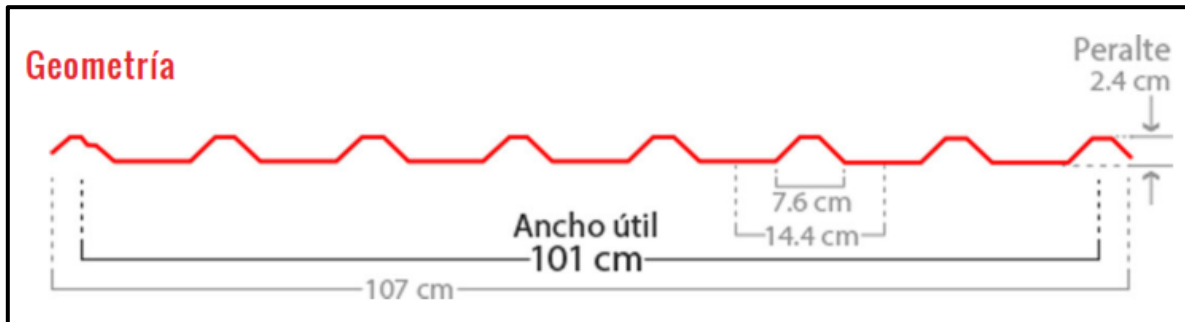


Fig. III.12 Geometría de una hoja de lámina galvanizada tipo R-101 (asbestos y aceros recubiertos. 2021)

La ecuación para el cálculo de la velocidad en canales abiertos propuesta por Robert Manning en 1889 es la siguiente:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde:

R el radio hidráulico que depende de la geometría de la sección:

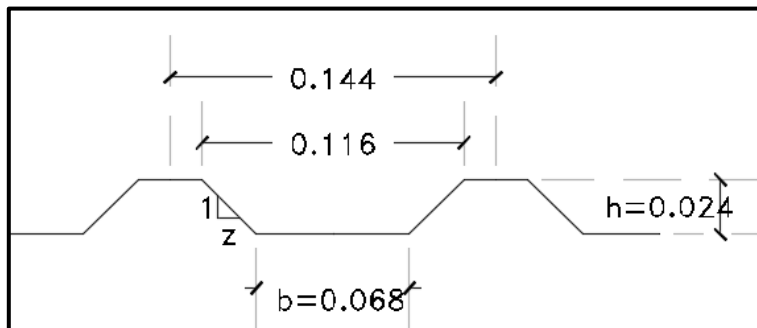


Fig. III.13 Geometría de del canal de la lámina en estudio (autoría propia, 2021)

$$R = \frac{(b + 2h)h}{b + 2h\sqrt{1 + z^2}}$$

El coeficiente de rugosidad (n) tiene el siguiente valor:

Material	Coeficiente de Manning n	Coef. Hazen-Williams C_H	Coef. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmalado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Tabla. III.1 Coeficiente de rugosidad para diferentes materiales (Heastad Methods Engineering staff & Michael E. Meadows, 2002)

Para la pendiente S se analizarán casos a partir de una inclinación de la cubierta de 5° hasta un ángulo de 60°, obteniendo la velocidad del agua para cada una de ellas.

Con los datos anteriores se realizó el cálculo de las diferentes velocidades que se muestran en la tabla siguiente:

Ángulo de inclinación del techo	Pendiente S (h/1)	Radio hidráulico (m)	Coeficiente de rugosidad (n)	Velocidad (m/s)
5°	0.0875	0.020	0.016	1.384
6°	0.1051	0.020	0.016	1.517
7°	0.1228	0.020	0.016	1.640
8°	0.1406	0.020	0.016	1.755
9°	0.1584	0.020	0.016	1.862
10°	0.1763	0.020	0.016	1.965
11°	0.1944	0.020	0.016	2.063
12°	0.2126	0.020	0.016	2.158
13°	0.2309	0.020	0.016	2.249
14°	0.2493	0.020	0.016	2.337
15°	0.2679	0.020	0.016	2.422
16°	0.2867	0.020	0.016	2.506
17°	0.3057	0.020	0.016	2.587
18°	0.3249	0.020	0.016	2.667
19°	0.3443	0.020	0.016	2.746
20°	0.364	0.020	0.016	2.823
21°	0.3839	0.020	0.016	2.900
22°	0.404	0.020	0.016	2.974
23°	0.4246	0.020	0.016	3.049
24°	0.4452	0.020	0.016	3.122
25°	0.4663	0.020	0.016	3.196
30°	0.5774	0.020	0.016	3.556
35°	0.7002	0.020	0.016	3.916
40°	0.8391	0.020	0.016	4.287
45°	1	0.020	0.016	4.680
50°	1.1918	0.020	0.016	5.109
55°	1.4282	0.020	0.016	5.593
60°	1.7321	0.020	0.016	6.159

Tabla. III.2 Velocidades que puede alcanzar el agua para diferentes ángulos de inclinación (Autoría propia, 2021)

Si tomamos como referencia una longitud de cubierta de 30 m para una pendiente de 25°, tendríamos que el agua que cae en la cumbrera tardaría 9 segundos en llegar a la parte más baja, considero que es una velocidad bastante rápida que no permitiría el frenado de agua o granizo.

Con base a lo anterior, se propone una expresión matemática para calcular un coeficiente de acumulación del granizo en cubiertas que depende principalmente del ángulo de inclinación de ésta, se propone que:

$$Cr = \frac{25^\circ - \alpha}{20^\circ} \quad \text{----- Ec 3.1}$$

Acotando los resultados a tres casos:

a) $1; 1^\circ \leq \alpha \leq 5^\circ$

b) $\frac{25^\circ - \alpha}{20^\circ}; 5^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$

c) $0; \alpha > 25^\circ$

Gráficamente la expresión se puede interpretar como sigue:

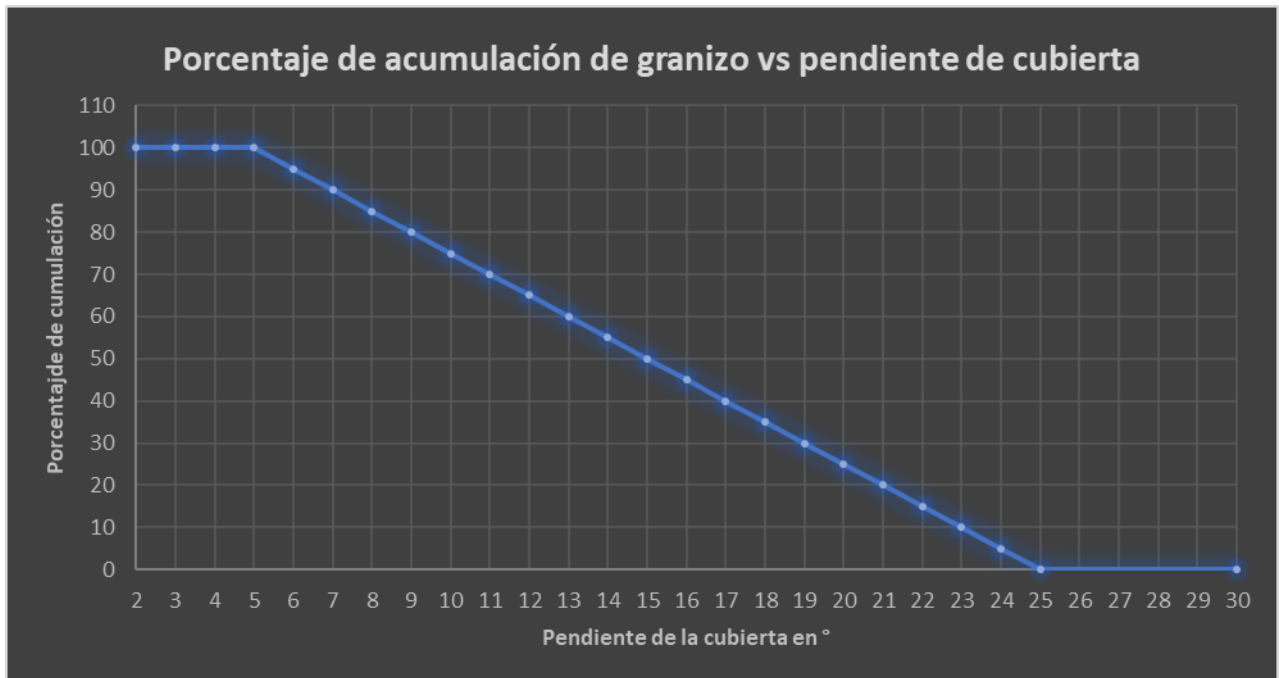


Gráfico. III.1 Porcentaje de acumulación de granizo con base al ángulo de inclinación del techo (Autoría propia, 2021)

Se propone que para cubiertas con un ángulo menor o igual a 5° de inclinación, es decir, techos con el 8% de pendiente, el granizo se acumulará en toda la longitud de la o las aguas por lo que el ingeniero estructurista deberá tener en cuenta una sobrecarga general ya sea para diseños nuevos o reforzamiento de estructuras existentes, más adelante se expondrá la densidad de la carga adicional posible en precipitaciones con caída de hielo.

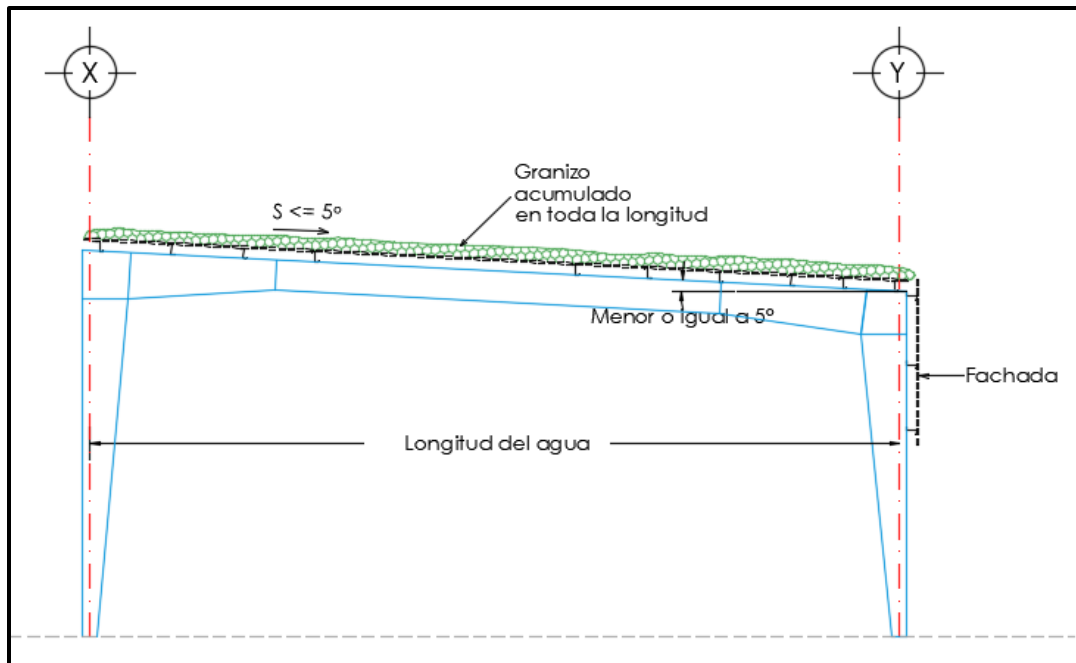


Fig. III.14 Esquema representativo del depósito de granizo en cubiertas con ángulos de inclinación menores e iguales a 5° (autoría propia, 2021)

Sin embargo, se considera que para un ángulo de inclinación mayor a 5° , es decir, para pendientes mayores al 8% el granizo no se acumula en toda la longitud del techo, por lo que la zona donde se presente una sobrecarga será cada vez menor conforme la pendiente sea mayor, la longitud de reforzamiento o de cuidado que el ingeniero calculista deberá tener será calculado haciendo uso de la ecuación 3.1 o el gráfico III.1.

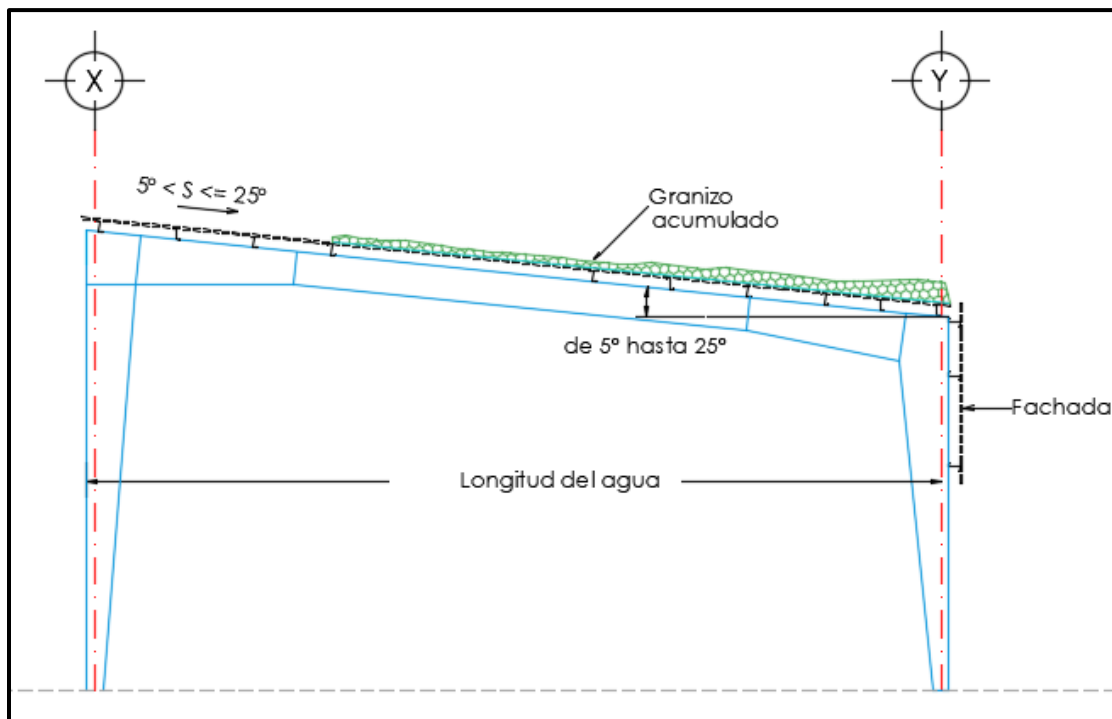


Fig. III.15 Esquema representativo del depósito de granizo en cubiertas con ángulos de inclinación mayores a 5° (autoría propia, 2021)

Este razonamiento aplica para cubiertas que cuenten con una o más caídas, siempre y cuando sea pendiente constante, por lo que quedan excluidos los techos del tipo arco que en hojas más adelante se hará el análisis respectivo.

Es importante destacar que en el fondo del valle que se forma en la intersección de dos caídas o bien en configuraciones diente de sierra el granizo puede obstruir fácilmente el drenaje pluvial, canalón y bajadas, provocando una carga importante durante un periodo largo, dato importante que deberá considerarse en las propuestas estructurales por parte del ingeniero.

En el anexo 5 se presentan tablas de ayudas que permiten conocer la longitud de sobrecarga según el ángulo de inclinación de esta, comprendiendo que en esa zona se deberán revisar los elementos estructurales que componen la cubierta.

Por observación, el granizo que cae y acumula en techos mantiene un espesor mayor en la parte más baja de la pendiente, efecto fácil de comprender por simple gravedad, pero ¿qué espesores podemos esperar?

Para responder a la pregunta se hará uso de la clasificación de las intensidades de lluvia que nos dará pauta para calcular un gasto mínimo y máximo de agua y granizo en una precipitación.

Intensidad de precipitación	
Intensidad (mm/h)	Tipo de precipitación
>75 mm	Lluvia intensa a extraordinaria
De 25 a 75 mm	Lluvia fuerte a muy fuerte
<25 mm	Lluvia

Tabla III.3 Intensidades de lluvia según el Servicio Meteorológico Nacional (SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL, 2020)

Tabla correspondencia intensidad de precipitación		
Color	Intens. (mm/h)*	Tipo de precipitación
	mayor a 250	Granizo de gran tamaño
	mayor a 250	Torrencial y granizo
	100 a 250	Torrencial y prob. granizo
	40 a 100	Lluvia muy fuerte a torrencial
	16 a 40	Lluvia fuerte
	6'5 a 16	Lluvia moderada
	2'5 a 6'5	Lluvia ligera
	1 a 2'5	Lluvia débil
	0'4 a 1	Lluvia muy débil
	0'1 a 0'4	Traza de precipitación

Tabla III.4 Intensidades de lluvia según el sitio web de la estación meteorológica Meteolobios de Galicia, España (Meteolobios, 2021)

Es de lo más común que las lluvias con presencia de granizo sean intensas y muchas de ellas duraderas, por lo que para este estudio se tomará una intensidad de 250 mm/h como gasto máximo y con ello determinar la densidad de sobrecarga en las cubiertas.

Por la geometría irregular que forma el “motón” de granizo que queda en las cubiertas, se opta por considerar una carga no balanceada, es decir, que tendrá un valor máximo y un mínimo como se representa a continuación en los siguientes modelos de análisis:

III.3. PESO VOLUMÉTRICO DEL GRANIZO

Durante el periodo de esta investigación, registré varias lluvias con granizo en Puebla y Tlaxcala, detectando diferentes tamaños en cada una de ellas, pequeños desde monedas de 10 centavos y grandes como un limón, en promedio el granizo que cae es chico, pero por las altas temperaturas tienden a formar grandes espesores que tardan mucho en derretirse.

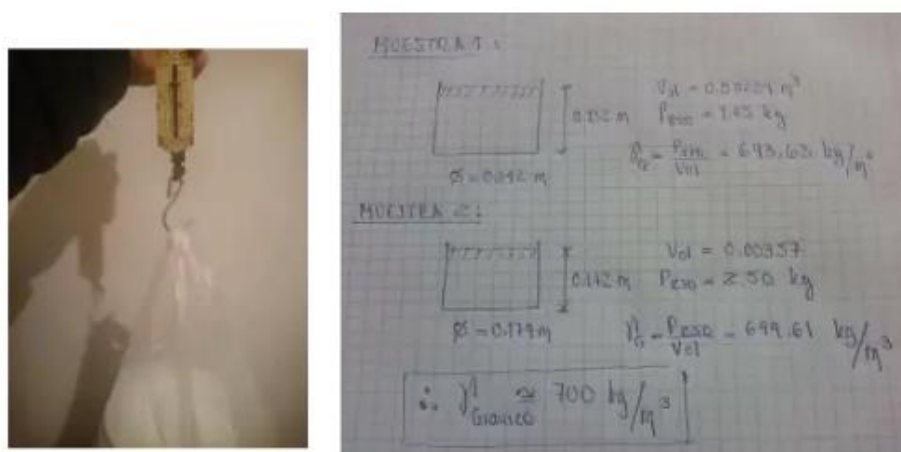


Fig. III.16 Tamaños de granizo registrados durante 2020 y 2021 (autoría propia, 2021)



Fig. III.17 Tamaños de granizo registrados durante 2020 y 2021 (autoría propia, 2021)

En 2017 se realizó en Bolivia el cálculo de la densidad del granizo caído durante una tormenta mediante dos muestras. Los cálculos arrojaron una densidad promedio de 690 kg/m³. De igual manera, se llevaron a cabo experimentos similares, en esta ocasión con cinco muestras con recipientes de diferentes volúmenes.



Se realizó el cálculo de la densidad del granizo para sucre en fechas Febrero, 2017 alcanzando una densidad de 700 kg/m³.

Fig. III.18 Estudios realizados en Bolivia (Julio Peñaranda, 2017)

Con la ayuda de una báscula y recipientes de plástico se registró el peso del granizo en ellos, cabe mencionar que el granizo se compactó hasta llenar el recipiente y fue así como se procedió a pesar.



Fig. III.19 Muestra 1 y 2 para cálculo de la densidad del granizo (autoría propia, 2021)



Fig. III.20 Muestra 3, 4 y 5 para cálculo de la densidad del granizo (autoría propia, 2021)

Los resultados son los siguientes:

Recipiente	Volumen ml	Volumen m ³	Peso con granizo (kg)	Peso volumétrico (kg/m ³)
1	270	0.00027	0.155	574.07
2	685	0.000685	0.411	600.00
3	830	0.00083	0.535	644.58
4	500	0.0005	0.324	648.00
5	4100	0.0041	2.536	618.54

Promedio = 617.04

Los resultados son similares al ejercicio realizado en Bolivia, no se debe olvidar que las variantes principales de este experimento son el tamaño del granizo, que influye directamente en el acomodo en los recipientes de medición, así como la temperatura y otros factores que externos que pudieran modificar los resultados. Se propone para esta investigación un valor de 700 kg/m³ de manera conservadora, dato que será utilizado en los cálculos de densidades más adelante.

III.4. PROPUESTA DE DENSIDADES DE GRANIZO PARA TECHOS DE PENDIENTE CONSTANTE

III.4.1 CUBIERTAS DE UNA O DOS AGUAS CON CANALÓN EXTERNO (CAÍA LIBRE).

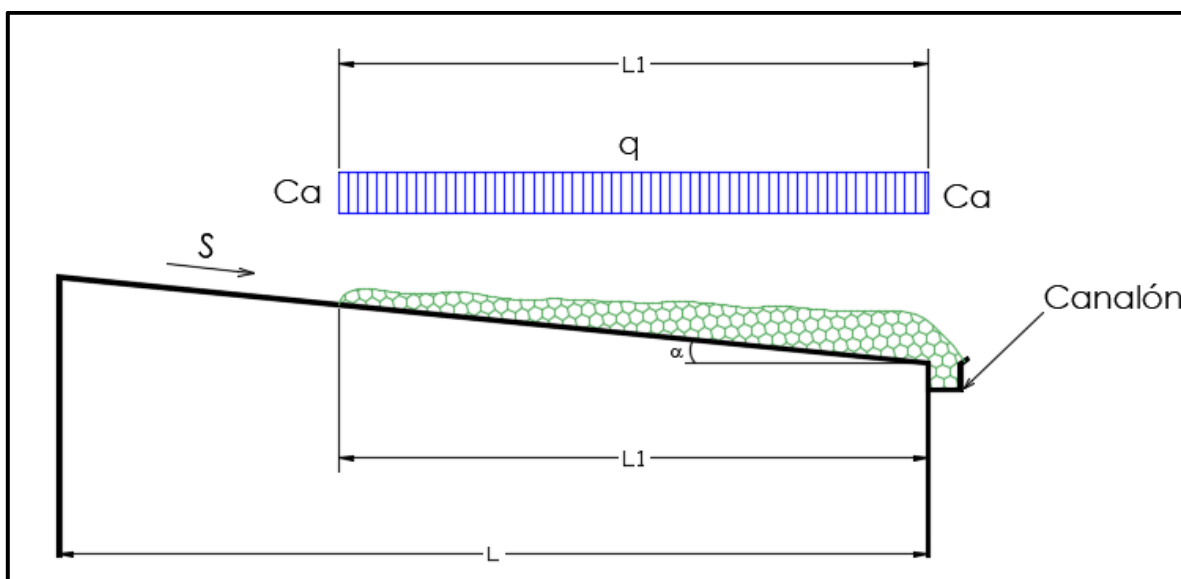


Fig. III.21 Modelo propuesto para el análisis de carga por granizo (autoría propia, 2021)

De la figura anterior L es la longitud total del agua, $L1$ es la longitud de acumulación de granizo (zona de revisión) calculada con la ecuación 3.1, gráfico III.1 o con ayuda del anexo 5, Ca es el coeficiente de carga y q es la carga calculada con unidades de peso / unidad de área.

Para pendientes de una o dos aguas donde no haya algún obstáculo al fondo de la cubierta como son los faldones (muro de lámina para fachadas) el granizo recorrerá toda la longitud de la cubierta hasta llegar al canalón, cuando este se tape por exceso de hielo, comenzará a acumularse. Se propone un modelo de carga distribuida constante para fines de análisis, dicha carga no alcanzará grandes espesores ya que, al obstruirse el canalón, que además es de poca altura, éste

tendería a colapsarse, condición favorable a la nave ya que induciría que el hielo resbale fácilmente por toda la cubierta hasta el suelo.

Conservadoramente y para coincidir con el criterio de las NTC-2017, se decide tomar un espesor constante de 15 cm tendiendo así la siguiente densidad:

$$q = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.15m = 102 kg/m^2$$

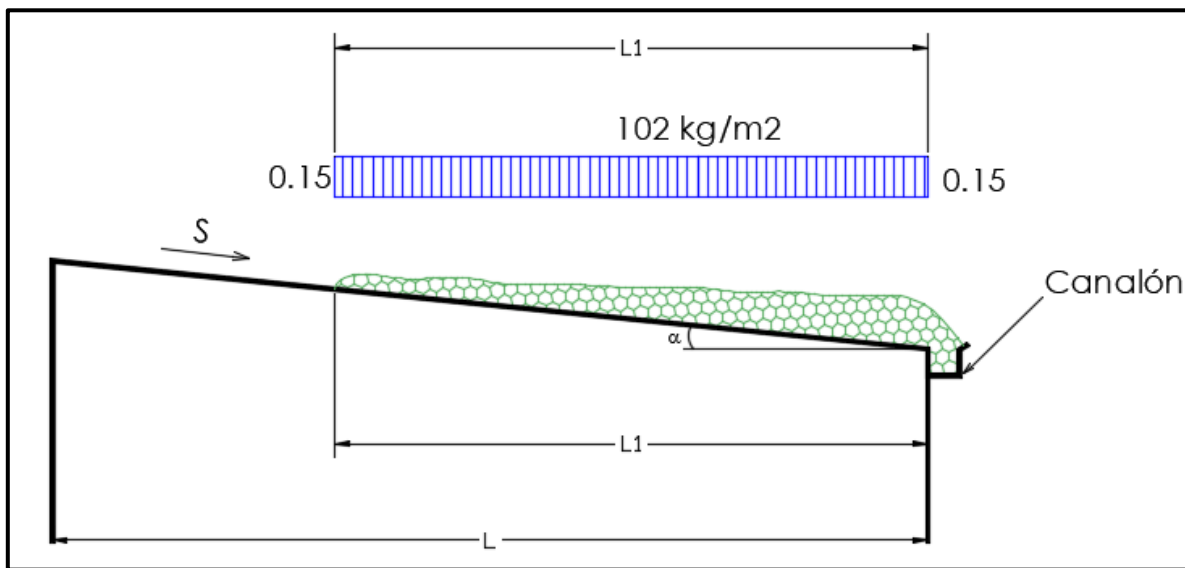


Fig. III.22 Densidad propuesta para cubiertas de una o dos aguas con canalón exterior (autoría propia, 2021)

III.4.2 CUBIERTAS DE UNA O DOS AGUAS CON FALDONES AL EXTREMO

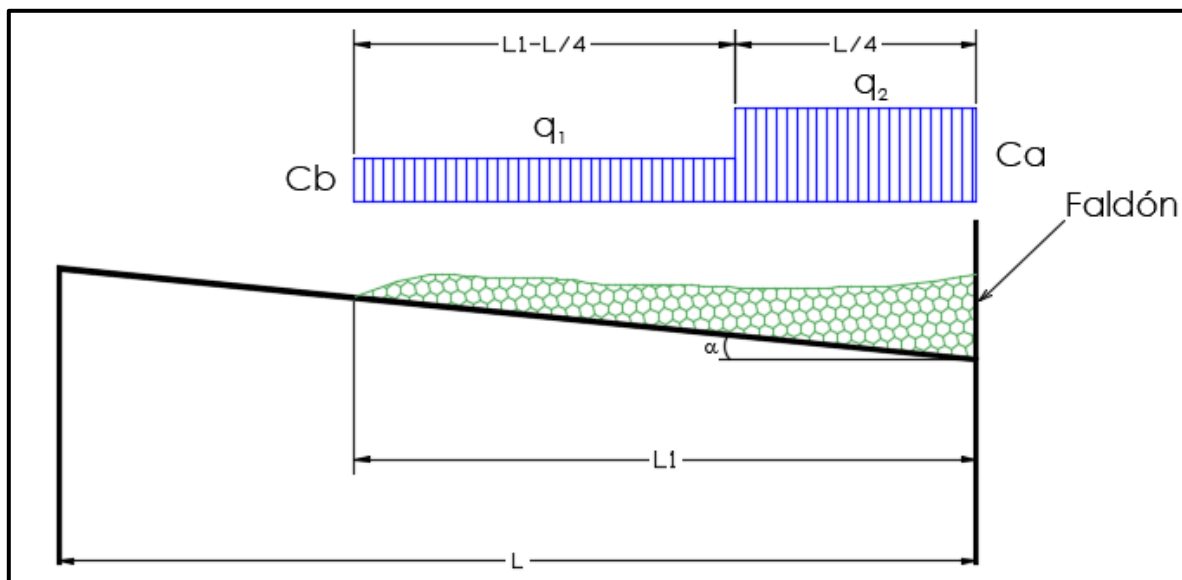


Fig. III.23 Modelo propuesto para el análisis de carga por granizo (autoría propia, 2021)

De la figura anterior L es la longitud total del agua, $L1$ es la longitud de acumulación de granizo (zona de revisión) calculada con la ecuación 3.1, gráfico III.1 o con ayuda del anexo 5, Ca y Cb son coeficientes de cargas que definen a q_1 y q_2 que son las cargas calculadas con unidades de peso / unidad de área.



En esta imagen se aprecia la acumulación de granizo junto al faldón recto durante la granizada registrada en julio de 2020 en los límites de Hidalgo y Puebla.

Al no haber una caña libre el granizo queda atrapado en el canalón y por las altas temperaturas, el hielo no se derrite fácilmente provocando una aglomeración rápida.

En esta ocasión la intensidad de granizo no fue tan grande, de lo contrario pudo causar problemas estructurales.

Fig. III.24 Acumulación de granizo por obstrucción de faldón recto en cubierta (autoría propia, 2021)



Fig. III.25 Acumulación de granizo por obstrucción de faldón recto en cubierta (autoría propia, 2021)

En la fotografía anterior se aprecia una falla estructural en el techo, justo en la zona del canalón y faldón recto. La investigación arrojó que el exceso de granizo que se presentó en Julio del 2019 terminó por obstruir el drenaje y al no tener una salida comenzó a acumularse hasta alcanzar una altura de medio metro aproximadamente, además, por las altas temperaturas en Tlaquepaque, Jalisco, el hielo permaneció ahí hasta por 15 horas.

Se propone un modelo de carga distribuida constante para fines de análisis, dicha carga dependerá en primera instancia del ángulo de inclinación del techo, teniendo un espesor mayor en la zona baja de la cubierta de tal manera que el cálculo siempre arroje revisar a más detalle el último cuarto de longitud pegado al canalón.

Para determinar el posible espesor de hielo sobre los techos y posteriormente la densidad de carga, se realiza una propuesta de variación mediante un coeficiente “c” como se muestra a continuación:

Espesor promedio para diseño		H =	0.5	m
Pendiente (°)	Cr	% de acumulación de granizo	Coeficiente (Ca)	Coeficiente (Cb)
2	0.00	100	0.150	0.150
3	0.00	100	0.150	0.150
4	0.00	100	0.150	0.150
5	0.00	100	0.150	0.150
6	0.05	95.00	0.150	0.150
7	0.10	90.00	0.200	0.200
8	0.15	85.00	0.300	0.280
9	0.20	80.00	0.400	0.310
10	0.25	75.00	0.500	0.000
11	0.30	70.00	0.600	0.370
12	0.35	65.00	0.700	0.400
13	0.40	60.00	0.800	0.430
14	0.45	55.00	0.900	0.460
15	0.50	50.00	1.000	0.500
16	0.55	45.00	1.050	0.525
17	0.60	40.00	1.100	0.550
18	0.65	35.00	1.150	0.575
19	0.70	30.00	1.200	0.600
20	0.75	25.00	1.250	0.625
21	0.80	20.00	1.300	0.650
22	0.85	15.00	1.350	0.675
23	0.90	10.00	1.400	0.700
24	0.95	5.00	1.450	0.725
25	1.00	0.00	1.500	0.750
30	1	0.00	1.550	0.775
35	1	0.00	1.600	0.800
40	1	0.00	1.650	0.825
45	1	0.00	1.700	0.850
50	1	0.00	1.750	0.875
55	1	0.00	1.800	0.900
60	1	0.00	1.850	0.925

Tabla III.5 Coeficientes Ca y Cb para determinar las cargas por granizo en cubiertas de una y dos aguas con faldones en sus extremos, autoría propia, 2021.

Para valores que no se encuentren en la tabla es válido realizar una interpolación lineal.

Con lo anterior, las densidades que el ingeniero calculista deberá tomar en cuenta se calcularán de la siguiente manera:

$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * Cb$$

$$q_2 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * Ca$$

III.4.3 CUBIERTAS DE DOS AGUAS O MÁS

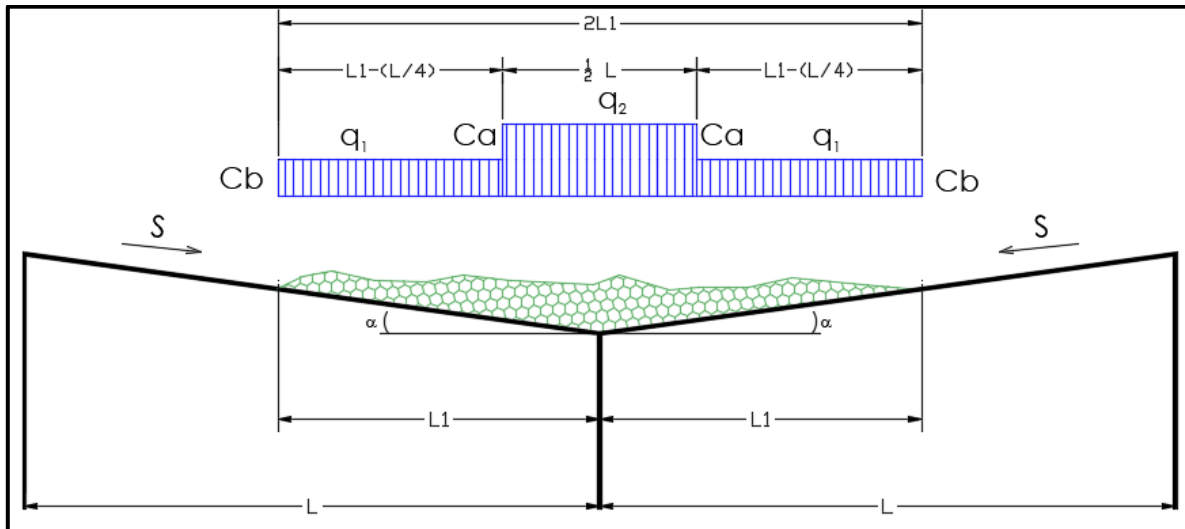


Fig. III.26 Modelo propuesto para el análisis de carga por granizo (autoría propia, 2021)

De la figura anterior L es la longitud total del agua, L1 es la longitud de acumulación de granizo (zona de revisión) calculada con la ecuación 3.1, gráfico III.1 o con ayuda del anexo 5, Ca y Cb son coeficientes de cargas que definen a q1 y q2 que son las cargas calculadas con unidades de peso / unidad de área.

Cuando el área a cubrir es de más de 50 m de ancho es frecuente recurrir a cubiertas de más de dos aguas (caídas) logrando con ello una estructura más ligera y por ende económica, sin embargo, una desventaja frecuente con el granizo sucede cuando el canalón se obstruye provocando además de la sobrecarga, fugas de agua que afectan a todo lo que en el interior de la nave esté en resguardo.



En esta imagen se puede observar con facilidad que el canalón se tapó por completo durante la granizada registrada en julio de 2020 en los límites de Hidalgo y Puebla.

Es notable la acumulación del granizo a lo largo de la cubierta para una pendiente del 10% (6°), que concuerda con las propuestas de carga.

De presentarse una caída de granizo de mayor intensidad, estaríamos observando fallas estructurales como deformaciones notables.

Fig. III.27 Obstrucción del canalón por granizo en nave a dos aguas (autoría propia, 2021)

Tomando como base un espesor máximo de 100 cm (700 kg/m^2) para una pendiente de 60° , se propone también al igual que las cubiertas a un agua, un modelo de carga distribuida constante. Para calcular el posible espesor de hielo sobre los techos y posteriormente la densidad de carga, se realiza una propuesta de variación mediante un coeficiente “c” como se muestra a continuación:

Pendiente (°)	Cr	% de acumulación	Coeficiente (Ca)	Coeficiente (Cb)
2	0.00	100	0.150	0.150
3	0.00	100	0.150	0.150
4	0.00	100	0.150	0.150
5	0.00	100	0.150	0.150
6	0.05	95.00	0.150	0.150
7	0.10	90.00	0.200	0.100
8	0.15	85.00	0.250	0.125
9	0.20	80.00	0.300	0.150
10	0.25	75.00	0.350	0.175
11	0.30	70.00	0.400	0.200
12	0.35	65.00	0.450	0.225
13	0.40	60.00	0.500	0.250
14	0.45	55.00	0.550	0.275
15	0.50	50.00	0.600	0.300
16	0.55	45.00	0.650	0.325
17	0.60	40.00	0.700	0.350
18	0.65	35.00	0.750	0.375
19	0.70	30.00	0.800	0.400
20	0.75	25.00	0.850	0.425
21	0.80	20.00	0.900	0.450
22	0.85	15.00	0.950	0.475
23	0.90	10.00	1.000	0.500
24	0.95	5.00	1.000	0.500
25	1.00	0.00	1.000	0.500
30	1	0.00	1.000	0.500
35	1	0.00	1.000	0.500
40	1	0.00	1.000	0.500
45	1	0.00	1.000	0.500
50	1	0.00	1.000	0.500
55	1	0.00	1.000	0.500
60	1	0.00	1.000	0.500

Tabla III.6 Coeficientes Ca y Cb para determinar las cargas por granizo en cubiertas de más de dos aguas en ejes intermedios, autoría propia, 2021.

Para valores que no se encuentren en la tabla es válido realizar una interpolación lineal.

Con lo anterior, las densidades que el ingeniero calculista deberá tomar en cuenta se calcularán de la siguiente manera:

$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 1.0 m * C_b$$

$$q_2 = 700 \frac{kg}{m^3} * 1.0 m * C_a$$

III.4.4 CUBIERTAS TIPO “DIENTE DE SIERRA”

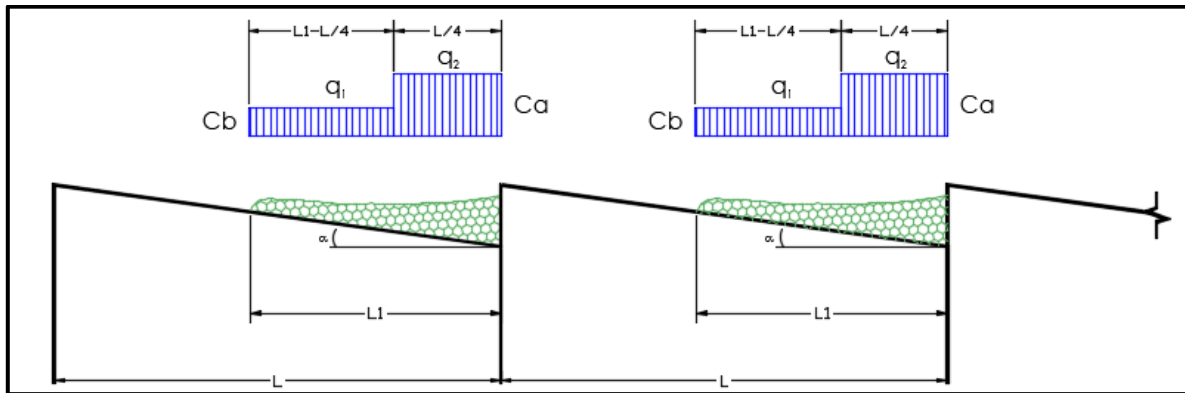


Fig. III.28 Modelo propuesto para el análisis de carga por granizo (autoría propia, 2021)

Este tipo de cubiertas son utilizadas para cubrir grandes anchos por medio de varios pórticos de longitudes equidistantes, generalmente son orientadas de tal manera que permiten la entrada de mucha luz natural por medio de sus faldones rectos. Este tipo de configuraciones presenta el mismo problema para el granizo que aquellas cubiertas con faldones rectos en sus extremos, permitiendo la acumulación de hielo al fondo de los valles por lo que se propone la misma solución haciendo uso de la tabla III.5.1

Para valores que no se encuentren en la tabla es válido realizar una interpolación lineal.

Con lo anterior, las densidades que el ingeniero calculista deberá tomar en cuenta se calcularán de la siguiente manera:

$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * Cb$$

$$q_2 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * Ca$$

III.5. ANÁLISIS DE ACUMULACIÓN DE GRANIZO PARA TECHOS CURVOS

Las cubiertas con techos curvos son muy usuales por su economía y fácil fabricación, usada principalmente en centros deportivos, escuelas, salones y en la industria, los hay con estructura o sin ella, salvando claros desde los 20 metros sin apoyos intermedios. Estas cubiertas suelen ser apoyadas en muros perimetrales formados por piezas de mampostería o bien en columnas de concreto reforzado o metálicas.

Las pendientes de estas estructuras suelen ser desde los 25° de inclinación como mínimo, esto para logra una curvatura lo suficientemente grande para dar altura al centro del claro formando un arco, sin embargo, uno de los principales problemas funcionales de este tipo de cubiertas es el no restringir correctamente la flecha al centro del techo, debido a un mal cálculo y por proceso constructivo, esto provoca que sea una zona factible a la acumulación del granizo, y lo podemos comprobar con resientes granizadas que provocaron daños estructurales importantes.



Fig. III.29 Cubierta colapsada en la central de abastos de la CDMX (El Informador, 2021)

En los reglamentos consultados y mencionados con anterioridad no se encuentran registros de cómo se debe considerar la carga para este tipo de estructuras por lo que se propone con base a observación de cómo se ha acumulado el granizo en diferentes estructuras, teniendo un espesor máximo al centro de éstas y una disminución del peso conforme se aproxima al extremo de la cubierta, en la siguiente imagen podemos ver claramente este caso:



Fig. III.30 Colapso de cubierta curva en Tetla, Tlaxcala (autoría propia, 2021)

En la figura anterior se observa como al centro del claro del techo de 25 m de ancho fue donde se acumuló en granizo que finalmente provocó su colapso, es sencillo deducir que en las zonas extremas junto al canalón no hubo peso adicional y que la estructura no falló por causas diferentes que no sean la sobrecarga al centro de la cubierta.

Esta estructura contaba con 25 m de ancho por 50 m de largo, con columnas metálicas a cada 5 metros de separación y tres armaduras circulares, dos en sus extremos y una central.



Fig. III.31 Colapso de cubierta curva en Bolivia (Lopez Dóriga Digital, 2017)

En esta otra estructura se aprecia el mismo comportamiento de acumulación, con el peso máximo al centro del claro y un mínimo o nulo a los extremos.

Con base a la observación del colapso de este tipo de estructuras por granizo, se opta por sugerir el siguiente modelo de cargas:

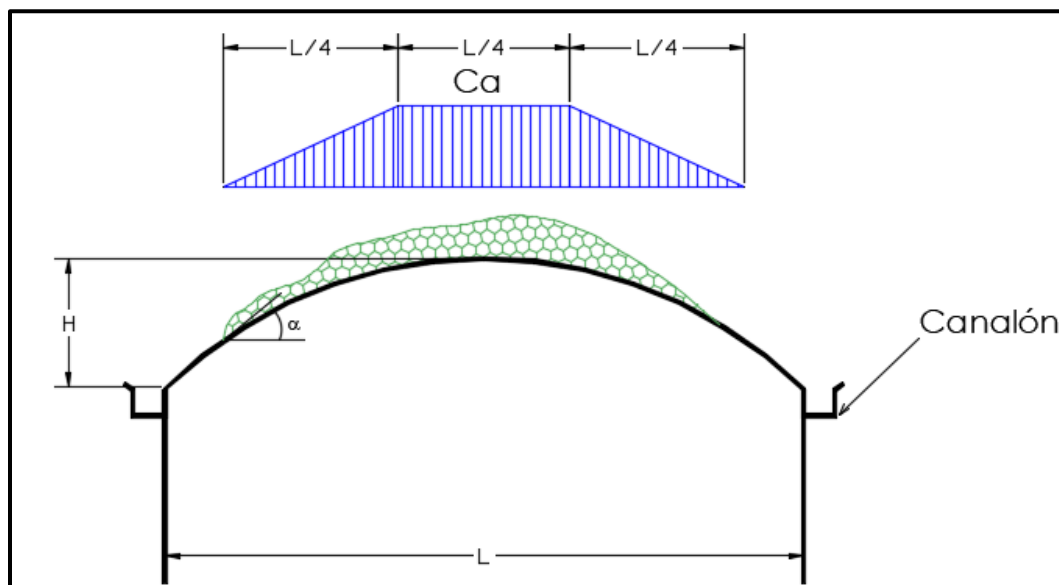


Fig. III.32 Modelo propuesto para el análisis de carga por granizo (autoría propia, 2021)

III.5.1 PROPUESTA DE DENSIDADES DE GRANIZO EN CUBIERTAS CON TECHOS CURVOS

Como parte del análisis se evalúan las diferentes pendientes o ángulos de inclinación que pueden adoptar las cubiertas curvas para aceptar aquellas que formen una parábola cuyos extremos permitan que el hielo resbale fácilmente, además, al conseguir curvas pronunciadas, se está atacando el principal problema, la deflexión máxima permisible al centro del claro.

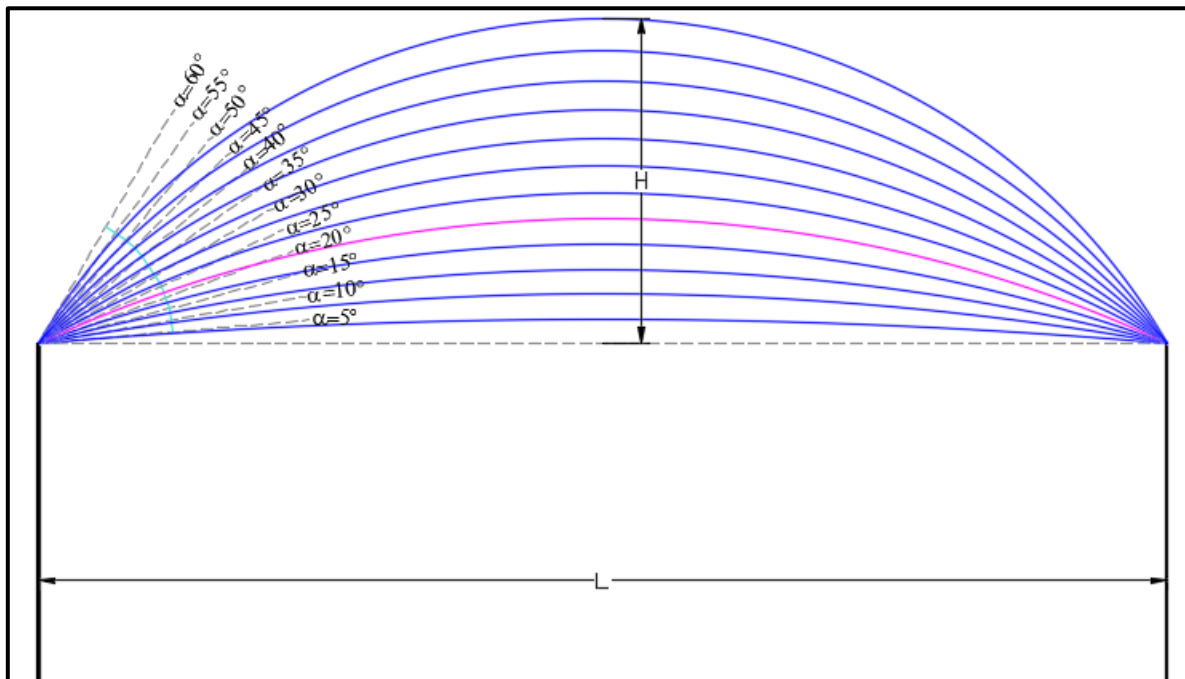


Fig. III.33 Diferentes pendientes para techos curvos (autoría propia, 2021)

Independientemente de que los techos curvos se propongan con estructura o sin ella por parte del arquitecto, inversionista o ingeniero estructural, se deberá adoptar una pendiente mínima de 25° de inclinación, ya que ángulos menores permitirían el acopio de hielo e incluso agua en casi prácticamente la totalidad del claro. En la imagen anterior se observa como a mayor pendiente se genera una parábola funcional y que estéticamente se ve acorde.

Para no estar dibujando curvaturas con ángulos de inclinación que puede resultar un poco tedioso, se genera la siguiente ayuda que permite obtener la altura mínima y máxima sugerida en función del ancho del claro a salvar.

- a) Pendiente mínima recomendada (25°)

$$H = L * 0.15$$

- b) Pendiente máxima recomendada (60°)

$$H = L * 0.30$$

Donde L es la longitud del claro en unidades de longitud y H es la altura al centro del vano según la figura III.33. De este modo siempre nos encontraremos dentro de pendientes que nos ayuden a no tener acumulación de granizo en los extremos de las cubiertas. Es válido calcular la altura H o bien revisar que la longitud propuesta esté dentro de ese rango.

Es evidente que entre mayor sea el ángulo de inclinación se formará al centro del claro una cumbrera más pronunciada facilitando que el granizo resbale con facilidad hacia los extremos, por otro lado, en pendientes menores se tendrá mayor cantidad de hielo acumulado en la cumbrera.

Con base a lo anterior, se propone una expresión matemática para calcular un coeficiente de acumulación del granizo en cubiertas que depende principalmente del ángulo de inclinación de ésta, se propone que:

$$Cr = \frac{60^\circ - \alpha}{35^\circ} \quad \text{----- Ec 3.2}$$

Acotando los resultados a tres casos:

- a) $1; 1^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ$

- b) $\frac{60^\circ - \alpha}{35^\circ}; 25^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

- c) $0; \alpha > 60^\circ$

Gráficamente la expresión se puede interpretar como sigue:

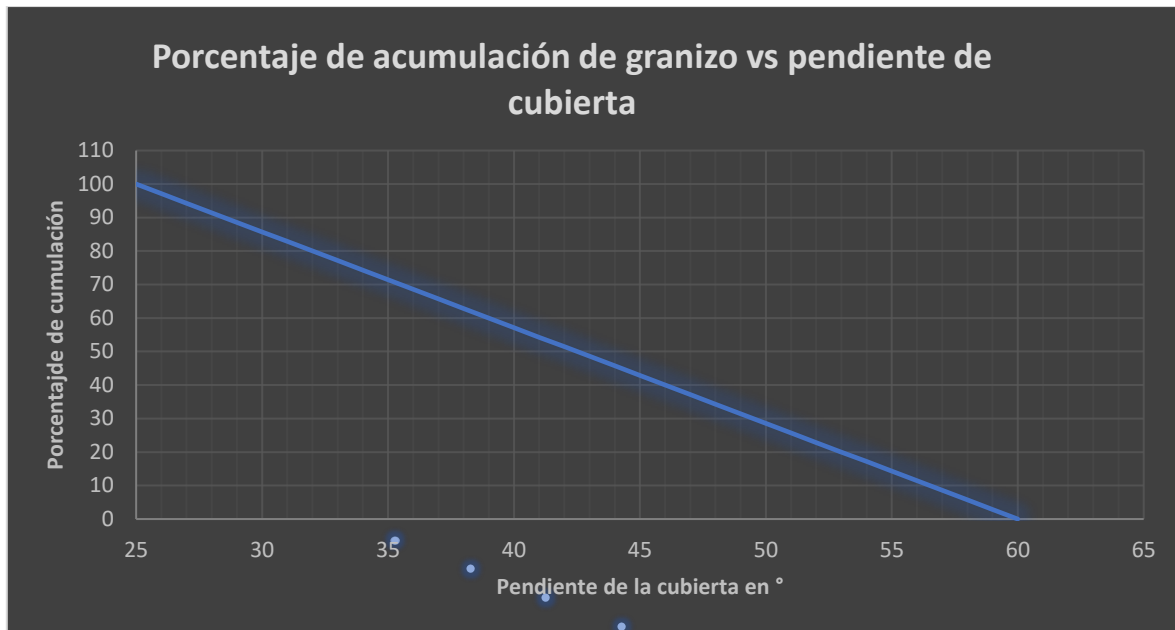


Gráfico. III.2 Porcentaje de acumulación de granizo con base al ángulo de inclinación del techo (Autoría propia, 2021)

No se recomiendan ángulos de inclinación menores a 25° porque la cubierta no tendría pendiente suficiente para resbalar el granizo e incluso el agua.

Tomando como base un espesor máximo de 50 cm (350 kg/m²) para una pendiente de 25°, se propone también al igual que las cubiertas de pendiente constante, un modelo de carga distribuida uniforme al cuarto central de la longitud del claro de la nave. Para calcular el posible espesor de hielo sobre los techos y posteriormente la densidad de carga, se realiza una propuesta de variación mediante un coeficiente “Cr” como se muestra a continuación:

Pendiente (°)	Cr	% de acumulación	Coeficiente (Ca)
25	1.0	100	1.000
26	1.0	97	0.971
27	0.9	94	0.943
28	0.9	91	0.914
29	0.9	89	0.886
30	0.9	86	0.857
31	0.8	83	0.829
32	0.8	80	0.800
33	0.8	77	0.771
34	0.7	74	0.743
35	0.7	71	0.714
36	0.7	69	0.686
37	0.7	66	0.657
38	0.6	63	0.629
39	0.6	60	0.600
40	0.6	57	0.571
41	0.5	54	0.543
42	0.5	51	0.514
43	0.5	49	0.486
44	0.5	46	0.457
45	0.4	43	0.429
46	0.4	40	0.400
47	0.4	37	0.371
48	0.3	34	0.343
49	0.3	31	0.314
50	0.3	29	0.286
51	0.3	26	0.257
52	0.2	23	0.229
53	0.2	20	0.200
54	0.2	17	0.171
55	0.1	14	0.143
56	0.1	11	0.114
57	0.1	9	0.086
58	0.1	6	0.057
59	0.0	3	0.029
60	0.0	0	0.000

Tabla III.7 Coeficiente Ca para determinar las cargas por granizo en cubiertas curvas, autoría propia, 2021.

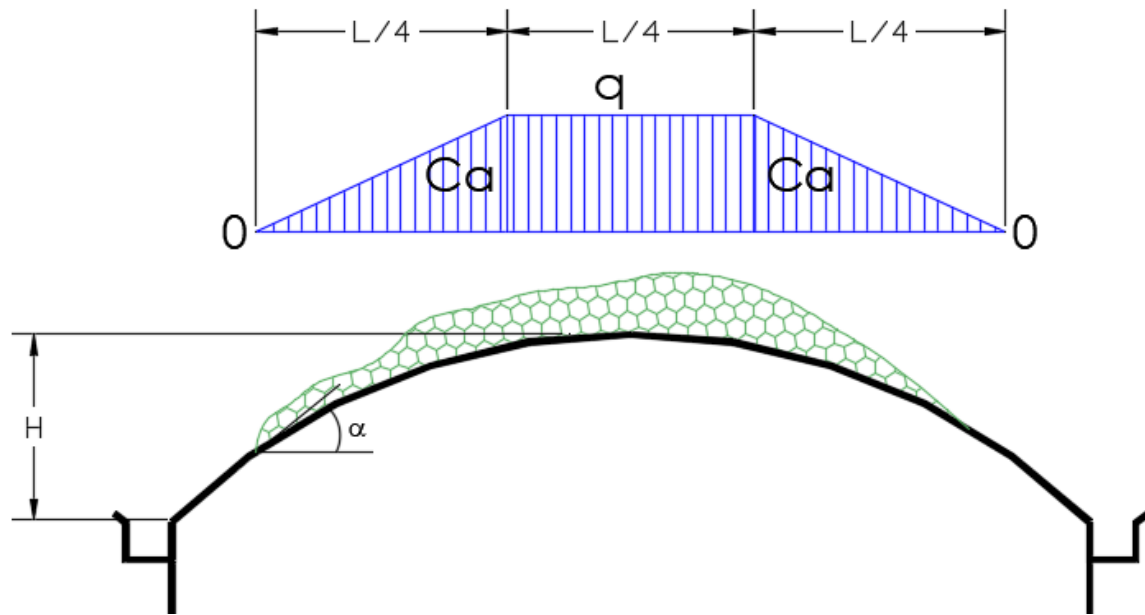


Fig. III.34 Densidad q en función de la pendiente de inclinación y coeficiente Ca (autoría

$$q = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * Ca$$

III.6. CONCLUSIONES

1. Con base a 5 experimentos se propone una densidad del granizo de 700 kg/m³.
2. Se propone un espesor mínimo de 15 cm como sobrecarga para todos los tipos de cubierta y como espesor constante para cubiertas con pendientes menores a 5° y sin faldones rectos en sus extremos.
3. Se propone un espesor máximo de 50 cm para techos a un agua, cubiertas dientes de sierra o caídas extremas de naves con más de dos aguas que tengan ángulos de inclinación menores o iguales a 25° y para un mayor grado de inclinación el espesor irá en aumento hasta un 200%.
4. Para cubiertas a dos aguas o más, se propone para los ejes centrales, una sobrecarga de 100 cm de peralte, mismo que dependerá del ángulo de inclinación de la cubierta.
5. Se propone un espesor máximo de diseño de 50 cm para cubiertas curvas.
6. La zona de revisión por sobrecarga dependerá principalmente del ángulo de inclinación del techo.
7. Se proporcionan tablas y fórmulas de fácil interpretación para que el usuario pueda calcular valores como:
 - a. Longitud de sobrecarga
 - b. Densidad de la sobrecarga, máxima y mínima
 - c. Zonas de cuidado para revisión de los largueros

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE LARGUEROS DE CUBIERTA

IV.1. ANÁLISIS DE LAS CARGAS

Conocer adecuadamente los pesos que un techo industrial puede tener es de gran importancia y utilidad al elegir la solución estructural, esto también impacta en la inversión inicial y en el diseño de todos los elementos que componen la nave. Cada día los edificios industriales implementan nuevas tecnologías y actualmente existe un catálogo muy variado de sobrecargas, sobre todo de las denominadas muertas.

IV.1.1 Cargas Muertas

Las cargas muertas son los pesos de todos los pesos constructivos, de los acabados, de las instalaciones y que actúan permanentemente en el techo y su peso no cambia sustancialmente en el tiempo (COREMUN, 2016).

Para la consideración de las cargas muertas en techos industriales se debe tener presente los pesos reales de todo aquello que puede tener la cubierta, desde la lámina, paneles solares, instalaciones eléctricas, de gas y de agua, techos verdes, entre otros elementos.

Tipo de lámina	Peso	Unidad			
Pintro C-42 o R-101 cal. 26	4.70	kg/m ²	Galvatecho 26/26 5"	15.45	kg/m ²
Pintro C-42 o R-101 cal. 24	6.00	kg/m ²	Galvatecho 26/26 6"	16.78	kg/m ²
Pintro KR-18 cal. 24	6.00	kg/m ²	Galvatecho 26/28 1"	8.75	kg/m ²
Econotecho 1"	6.04	kg/m ²	Galvatecho 26/28 1.5"	9.32	kg/m ²
Econotecho 1.5"	6.42	kg/m ²	Galvatecho 26/28 2"	9.70	kg/m ²
Econotecho 2"	6.80	kg/m ²	Multytecho 26/26 1"	10.60	kg/m ²
Galvatecho 26/26 1"	10.60	kg/m ²	Multytecho 26/26 1.5"	11.15	kg/m ²
Galvatecho 26/26 1.5"	11.15	kg/m ²	Multytecho 26/26 2"	11.69	kg/m ²
Galvatecho 26/26 2"	11.69	kg/m ²	Multytecho 26/26 2.5"	12.27	kg/m ²
Galvatecho 26/26 2.5"	12.27	kg/m ²	Multytecho 26/26 3"	12.84	kg/m ²
Galvatecho 26/26 3"	12.84	kg/m ²	Multytecho 26/26 4"	13.97	kg/m ²
Galvatecho 26/26 4"	13.97	kg/m ²	Multytecho 26/26 5"	15.45	kg/m ²
			Multytecho 26/26 6"	16.78	kg/m ²

Tabla. IV.1 Ejemplos de algunos tipos de láminas mayormente usados y sus pesos (autoría propia, 2021).

La lámina es un elemento esencial en un techo industrial, las más comunes son las galvanizadas de calibres 26 y 24, pero también podemos encontrar paneles con diferentes configuraciones que son utilizados como aisladores acústicos y otros como aislantes térmicos.

Los largueros son las trabes que soportan la lámina, en ellos se fijan y se traslapan las hojas. Existen largueros de geometría tipo “C” o tipo “Z” peraltes desde las 6” hasta las 12” como uso común y espesores de calibre 14 para los más delgados y calibre 10 para los más pesados, la separación de colocación depende del análisis de cargas en la cubierta, influyendo también el criterio del ingeniero estructurista.

Tipo de larguero	Peso	Unidad
Larguero 6" cal. 14 @145	3.08	kg/m ²
Larguero 6" cal. 12 @145	4.25	kg/m ²
Larguero 6" cal. 14 @115	3.88	kg/m ²
Larguero 6" cal. 12 @115	5.36	kg/m ²
Larguero 8" cal. 14 @145	3.88	kg/m ²
Larguero 8" cal. 12 @145	5.37	kg/m ²
Larguero 8" cal. 14 @115	4.89	kg/m ²
Larguero 8" cal. 12 @115	6.77	kg/m ²
Larguero 10" cal. 14 @145	4.68	kg/m ²
Larguero 10" cal. 12 @145	6.59	kg/m ²
Larguero 10" cal. 14 @115	5.90	kg/m ²
Larguero 10" cal. 12 @115	8.30	kg/m ²
Larguero 12" cal. 14 @145	5.20	kg/m ²
Larguero 12" cal. 12 @145	7.34	kg/m ²
Larguero 12" cal. 14 @115	6.57	kg/m ²
Larguero 12" cal. 12 @115	9.25	kg/m ²

Tabla. IV.2 Ejemplos de algunos tipos de largueros mayormente usados y sus pesos (autoría propia, 2021).

Cada vez es más frecuente las solicitudes de accesorios y elementos no estructurales en las cubiertas, ya sea por estética o por cubrir una necesidad

funcional. Estos elementos se clasifican como misceláneos y su peso no es nada despreciable:

Concepto	Peso	Unidad
Misceláneos de cubierta	1.00	kg/m ²
Red contra incendios	3.00	kg/m ²
Plafond	15.00	kg/m ²
Impermiabilizante	3.00	kg/m ²
Colchoneta 2"	1.50	kg/m ²
Colchoneta 3"	2.25	kg/m ²
Colchoneta 4"	3.00	kg/m ²
Panel Solar	15.00	kg/m ²
TPO 45 mils	1.25	kg/m ²
Polyso	2.90	kg/m ²
Instalaciones básicas	3.00	kg/m ²

Tabla. IV.3 Ejemplos de algunos tipos de accesorios mayormente usados y sus pesos (autoría propia, 2021).

IV.1.2 Cargas Vivas

Se consideran cargas vivas las fuerzas que se producen por la ocupación del techo, son gravitacionales y no tienen carácter permanente, es decir, el peso no es el mismo todo el tiempo (COREMUN, 2016).

En relación con los techos industriales, las Normas Técnicas Complementarias 2017 proporciona dos valores para carga viva (figura III.5), 40 kg/m² para carga viva máxima que se utiliza para el diseño de los elementos principales y 20 kg/m² como carga viva instantánea, utilizada para revisión por servicio.

Destino de piso o cubierta	W	W _a	W _m	Observaciones
a) Habitación (casa –habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares)	0.8 (80)	1.0 (100)	1.9 (190)	1
b) Oficinas, despachos y laboratorios	1.0 (100)	1.8 (180)	2.5 (250)	2
c) Aulas	1.0 (100)	1.8 (180)	2.5 (250)	
d) Comunicación para peatones (pasillos, escaleras, rampas, vestíbulos y pasajes de acceso libre al público)	0.4 (40)	1.5 (150)	3.5 (350)	3 y 4
e) Estadios y lugares de reunión sin asientos individuales	0.4 (40)	3.5 (350)	4.5 (450)	5
f) Otros lugares de reunión (bibliotecas, templos, cines, teatros, gimnasios, salones de baile, restaurantes, salas de juego y similares)	0.4 (40)	2.5 (250)	3.5 (350)	5
g) Comercios, fábricas y bodegas	0.8W _m	0.9W _m	W _m	6
h) Azoteas con pendiente no mayor de 5 %	0.15 (15)	0.7 (70)	1.0 (100)	4 y 7
i) Azoteas con pendiente mayor de 5 %; otras cubiertas, cualquier pendiente.	0.05 (5)	0.2 (20)	0.4 (40)	4, 7 8 y 9
j) Volados en vía pública (marquesinas, balcones y similares)	0.15 (15)	0.7 (70)	3 (300)	

Tabla. IV.4 Cargas vivas recomendadas para diferentes destinos o usos (NTC-Criterios,2017)

IV.1.3 Cargas de viento

La determinación de las presiones de viento de diseño se sugiere sean obtenidas con base en el procedimiento bien explicado e ilustrado que se encuentran en el Manual de Obras Civiles - diseño por viento de la CFE, donde se proporcionan datos como velocidades regionales, categorías de terreno, alturas y temperaturas promedios para cada estado de la República Mexicana que permiten calcular con gran aproximación la presión dinámica base de diseño determinada por:

$$q_z = 0.047GV_D^2$$

Donde:

V_D se refiere a la velocidad de diseño en km/h y G es un factor de corrección por altura y temperatura respecto al nivel del mar.

El manual proporciona ayudas para la interpretación de las diferentes fuerzas que el viento ejerce en una nave industrial y con ellas es sencillo la evaluación del comportamiento de una nave industrial.

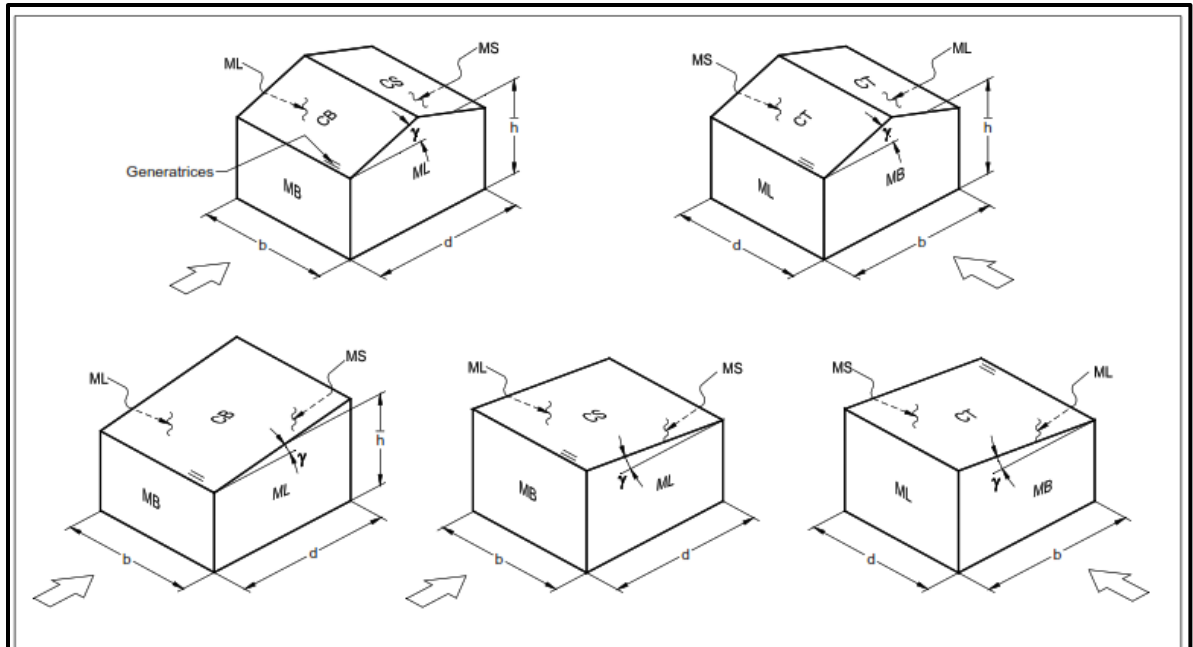


Fig. IV.1 Ayudas para cálculo de las presiones de viento (MDOC-CF 2008).

IV.2. ANÁLISIS DE LOS LARGUEROS

Los largueros de cubierta son colocados principalmente para darle soporte a la lámina o sistema de techo que llevará la nave industrial, su longitud obedece a la separación de pórticos, la separación entre ellos, así como el peralte y espesor a usar depende directamente de un análisis estructural.

Estos polines tienen la particularidad de colocarse sobre los pórticos o marcos principales con el ángulo de inclinación destinado para la cubierta, teniendo como consecuencia que la carga que reciba el elemento no coincide con ninguno de los ejes principales de la sección, haciendo trabajar al elemento a flexión biaxial.

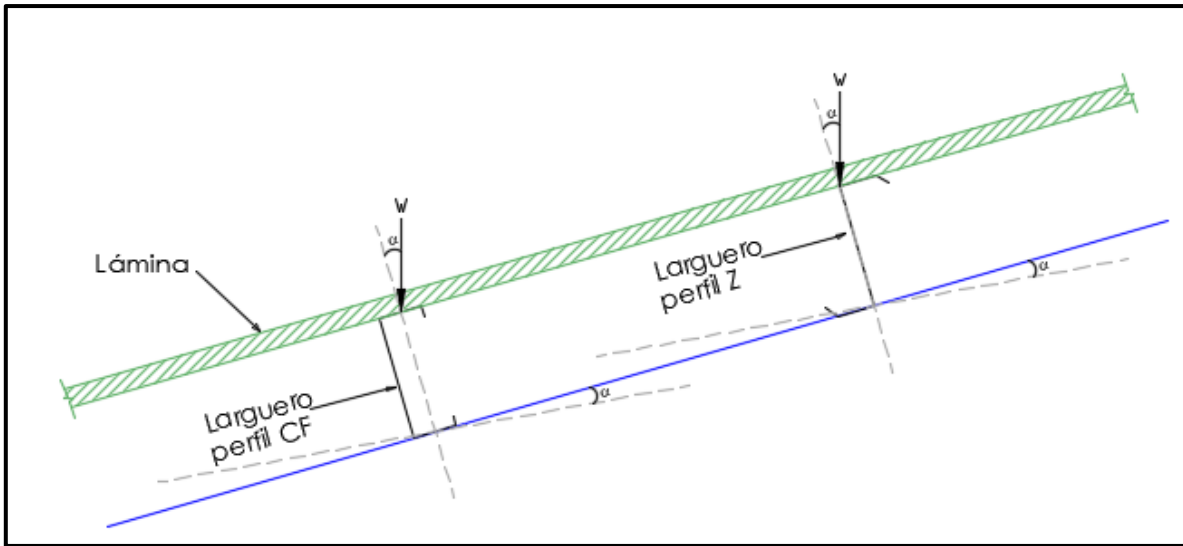


Fig. IV.2 Largueros de perfil CF y Z colocados según ángulo de inclinación de pórticos principales de la cubierta (autoría propia, 2021).

La lámina se fija en el patín superior del larguero logrando una restricción completa del mismo, como sucede en las vigas secundarias de un sistema de piso con cimbra metálica permanente, sin embargo, esta condición no aporta en la resistencia a flexión en el eje débil de la sección.

El ángulo de inclinación generará dos componentes, para determinar su valor se hará uso de la trigonometría. La componente horizontal, a pesar de tener un valor pequeño, no se debe despreciar, pues esta puede producir considerables tensiones y deformaciones en el alma.

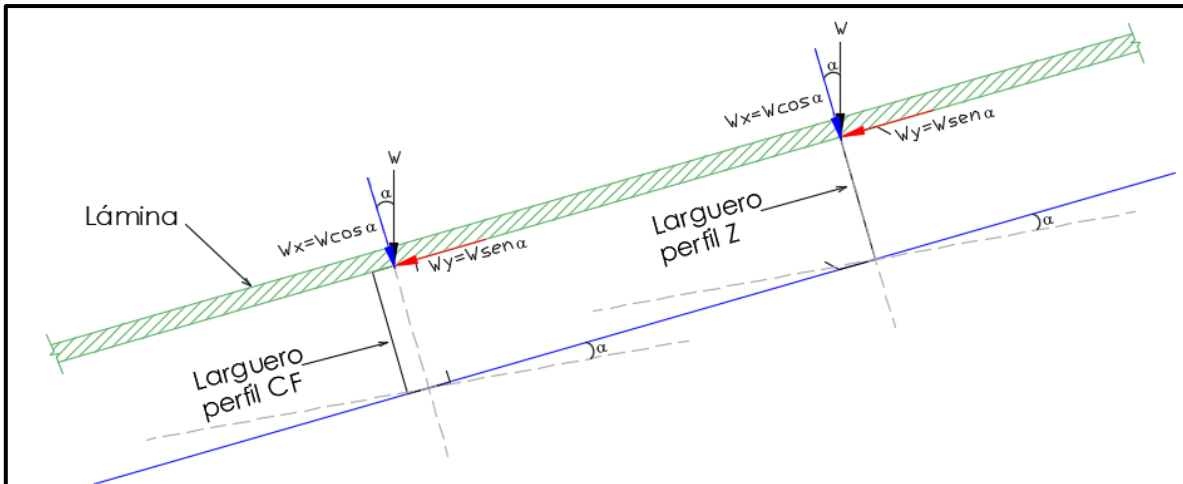


Fig. IV.3 Cálculo de las componentes para los dos ejes principales de los largueros (autoría propia, 2021).

Como el sentido horizontal es el eje débil, se suele restringir el alma con líneas de contraflambeos que ayudan a reducir los momentos actuantes, la cantidad de ejes de estos atiesadores dependerá inicialmente del largo del larguero.

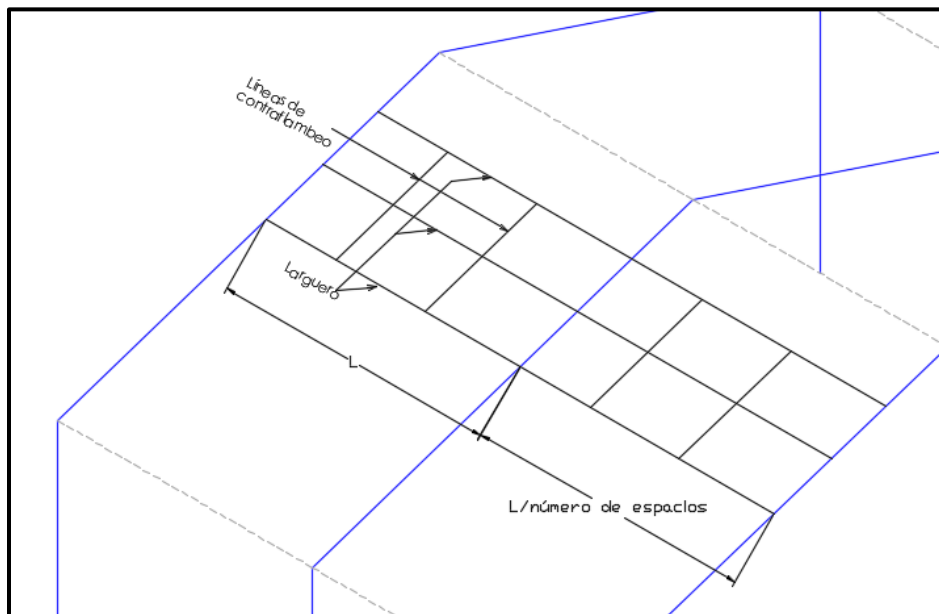
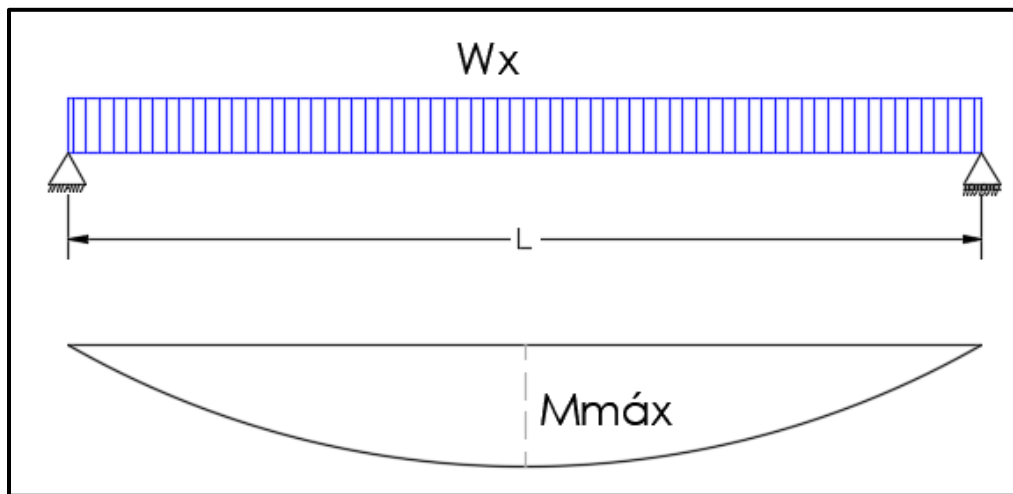


Fig. IV.4 Ubicación de contraflambeos en cubierta (autoría propia, 2021).

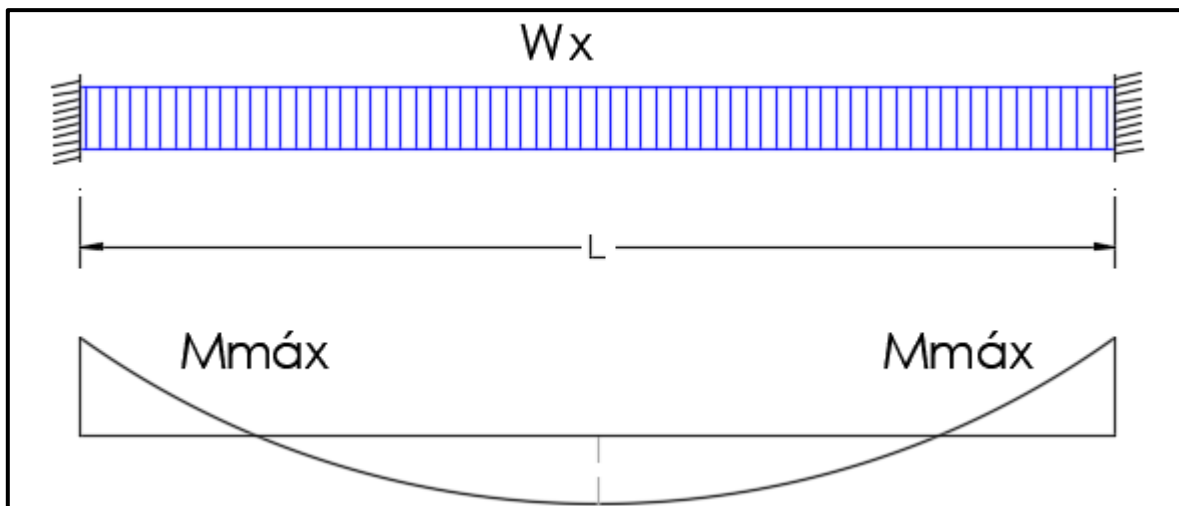
Tomando en cuenta lo anterior, se obtiene para cada eje principal, un modelo de análisis que permitirá calcular la resistencia máxima para cada sentido de análisis.

- a) Análisis del larguero en sentido “x” o sentido fuerte según la inercia de la sección.



$$Mmáx = \frac{Wx * L^2}{8} \dots Ec. 4.1$$

Fig. IV.5 Momento máximo para largueros simplemente apoyados (autoría propia, 2021).



$$Mmáx = \frac{Wx * L^2}{12} \dots Ec. 4.2$$

Fig. IV.6 Momento máximo para largueros con continuidad (autoría propia, 2021).

b) Análisis del larguero en sentido “y” o sentido débil según la inercia de la sección.

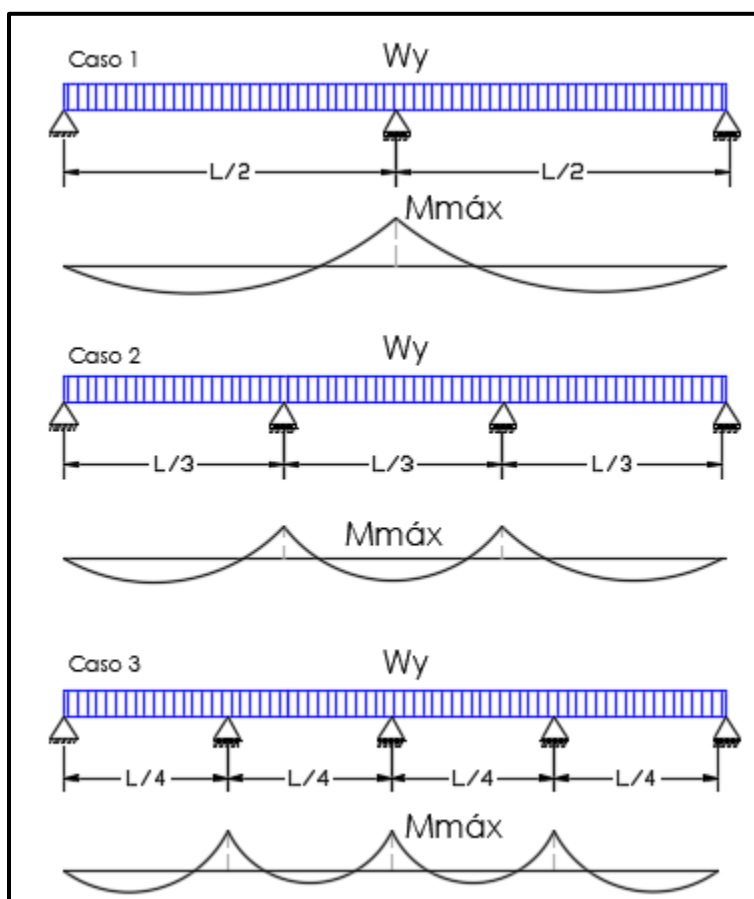


Fig. IV.7 Modelos de análisis para largueros en sentido débil con diferentes posiciones de contraflambeos (autoría propia, 2021).

Caso	Descripción	Momento máximo
Caso 1	Larguero con 1 eje de contraflamdeo al centro	$M_{máx} = \frac{W_y * L^2}{8} \dots Ec. 4.3$
Caso 2	Larguero con 2 ejes de contraflambeos equidistantes	$M_{máx} = \frac{W_y * L^2}{10} \dots Ec. 4.4$
Caso 3	Larguero con 3 ejes de contraflambeos equidistantes	$M_{máx} = 0.107 W_y * L^2 \dots Ec. 4.5$

Tabla. IV.1 Momentos máximos para largueros en sentido débil con diferentes posiciones de contraflambeos (autoría propia, 2021).

IV.2.1 Momentos máximos resistentes

El momento máximo resistente está dado por la siguiente expresión, que depende del material del elemento y el módulo de sección del eje de análisis:

$$M_{\text{máx}} = 0.9 * F_y * S_e$$

Considerando un $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ se obtienen los siguientes resultados:

Elemento	Módulo de sección en "x" (cm ³)	Momento resistente (kg-m)	Módulo de sección en "y" (cm ³)	Momento resistente (kg-m)
CF 4" cal. 14	13.75	313.09	5.49	125.01
CF 4" cal. 12	17.89	407.36	6.35	144.59
CF 6" cal. 14	23.42	533.27	5.14	117.04
CF 6" cal. 12	31.33	713.38	6.65	151.42
CF 8" cal. 14	38.37	873.68	7.68	174.87
CF 8" cal. 12	55.72	1268.74	10.49	238.86
CF 10" cal. 14	52.42	1193.60	7.83	178.29
CF 10" cal. 12	76.14	1733.71	11.15	253.89
CF 12" cal. 14	64.71	1473.45	13.44	306.03
CF 12" cal. 12	108.52	2471.00	19.13	435.59

Tabla. IV.5 Momentos máximos para largueros CF en sentido fuerte y débil para diferentes peraltes y espesores (autoría propia, 2021).

Elemento	Módulo de sección en "x" (cm ³)	Momento resistente (kg-m)	Módulo de sección en "y" (cm ³)	Momento resistente (kg-m)
ZF 6" cal. 14	26.7	607.96	7.84	178.52
ZF 6" cal. 12	36.87	839.53	11.13	253.43
ZF 8" cal. 14	39.46	898.50	7.82	178.06
ZF 8" cal. 12	54.83	1248.48	11.09	252.52
ZF 10" cal. 14	49.15	1119.15	7.80	177.61
ZF 10" cal. 12	73.27	1668.36	11.07	252.06
ZF 12" cal. 14	67.15	1529.01	13.86	315.59
ZF 12" cal. 12	112.64	2564.81	19.62	446.75

Tabla. IV.6 Momentos máximos para largueros ZF en sentido fuerte y débil para diferentes peraltes y espesores (autoría propia, 2021).

IV.2.2 Cargas máximas permisibles

Para cumplir con una revisión de flexión biaxial se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{Max}{Mrx} + \frac{May}{Mry} \leq 1$$

Donde Mr son los momentos resistentes y los Ma son los momentos actuantes.

Para el análisis de los diferentes peraltes de largueros que comúnmente se utilizan y además son perfiles comerciales, se opta por calcular la carga máxima permisible para diferentes áreas tributarias en función de sus propiedades geométricas, para lo cual, se analizan dos esquemas: elementos simplemente apoyados y con continuidad como propuestas reales de ejecución en la obra y así comparar ventajas.

Partiendo de las expresiones para el cálculo de deformaciones, se calcula la carga máxima que la sección puede soportar sin rebasar la flecha máxima permisible que tendrá un valor de L/240 como lo indican las NTC-2017:

IV.2.2.1 Largueros con un modelo simplemente apoyado

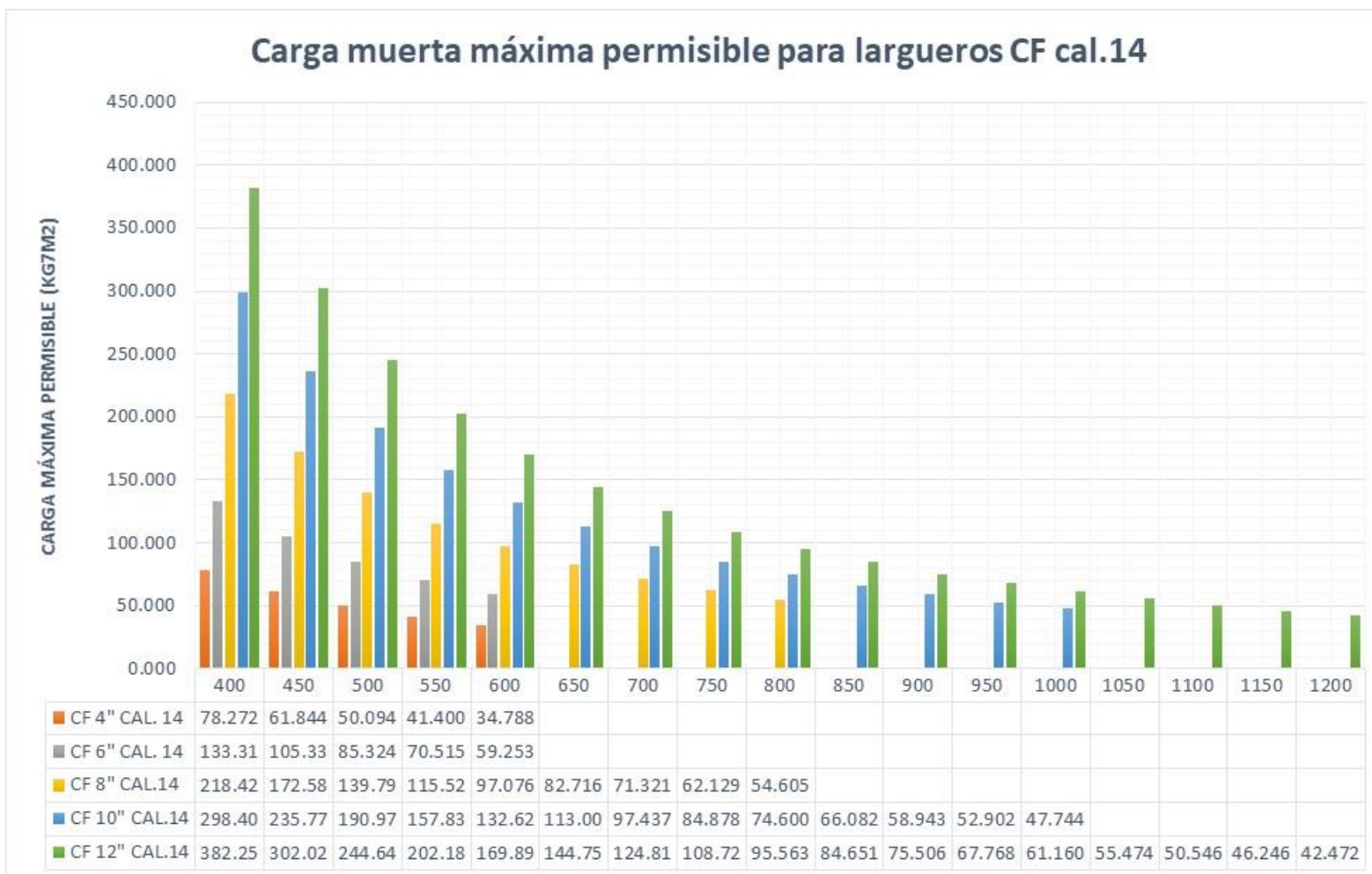


Gráfico. IV.1 Cargas máximas permisibles para largueros CF cal. 14 (autoría propia, 2021).

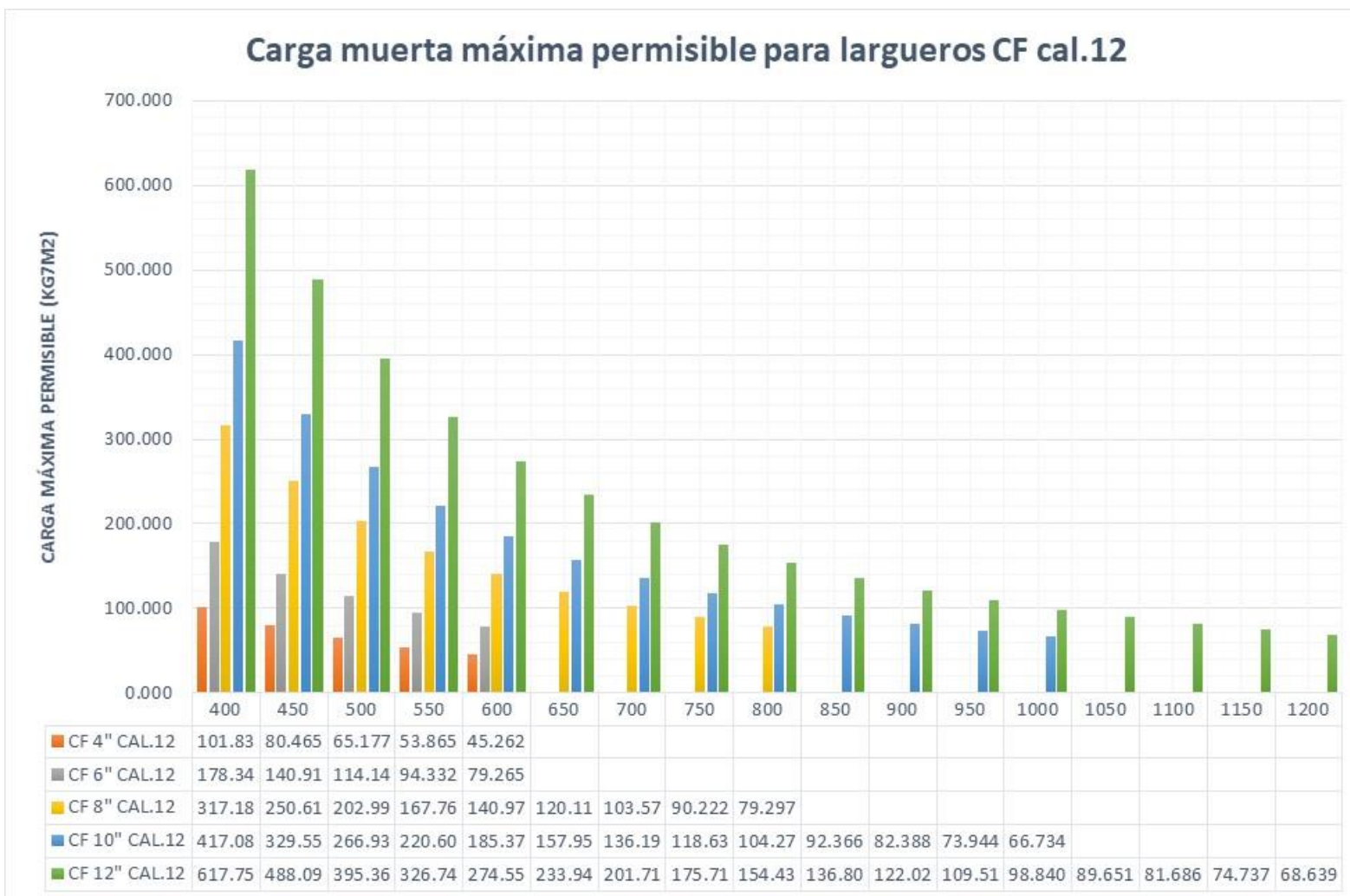


Gráfico. IV.2 Cargas máximas permisibles para largueros CF cal. 12 (autoría propia, 2021).

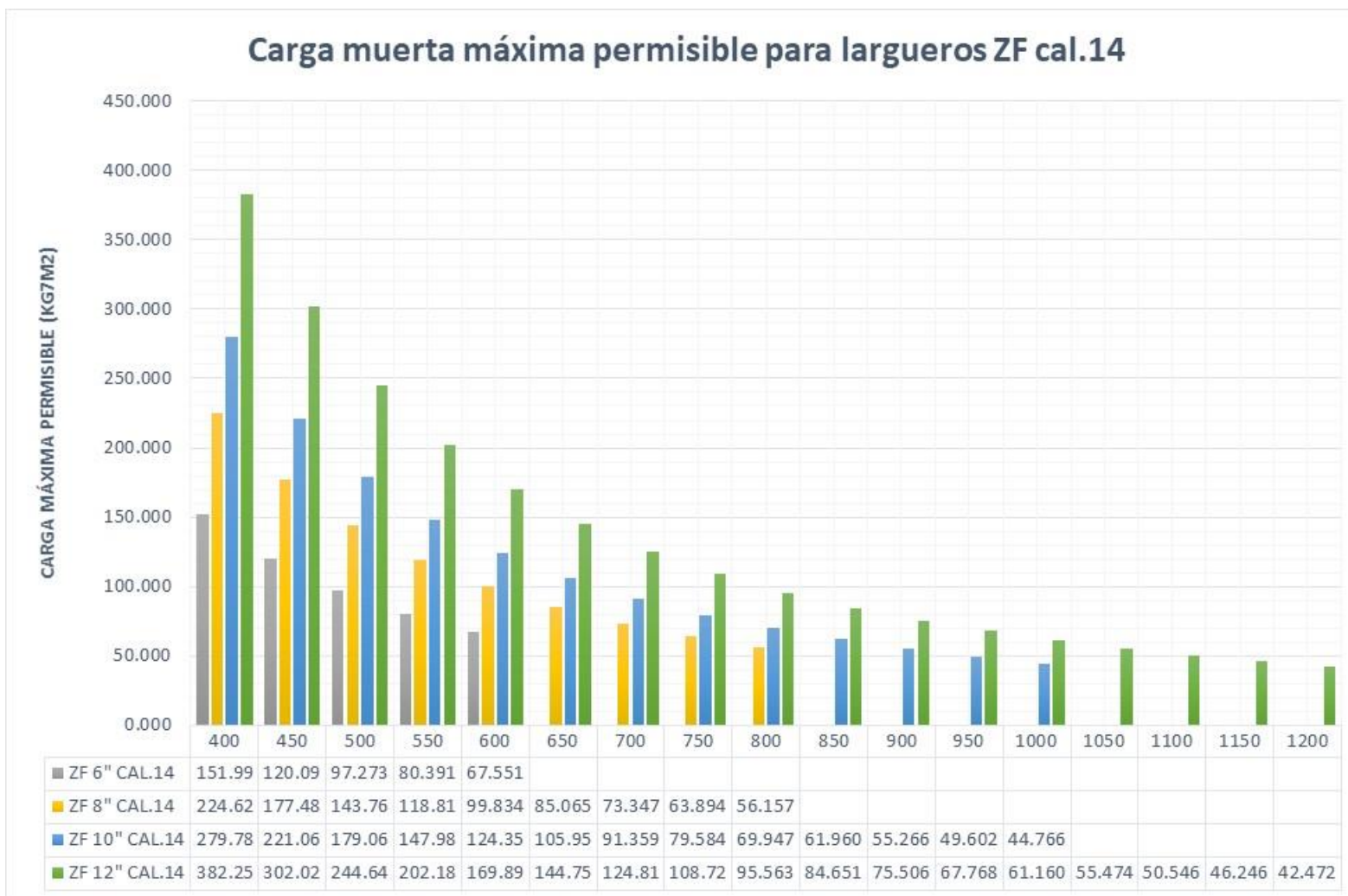


Gráfico. IV.3 Cargas máximas permisibles para largueros ZF cal. 14 (autoría propia, 2021).

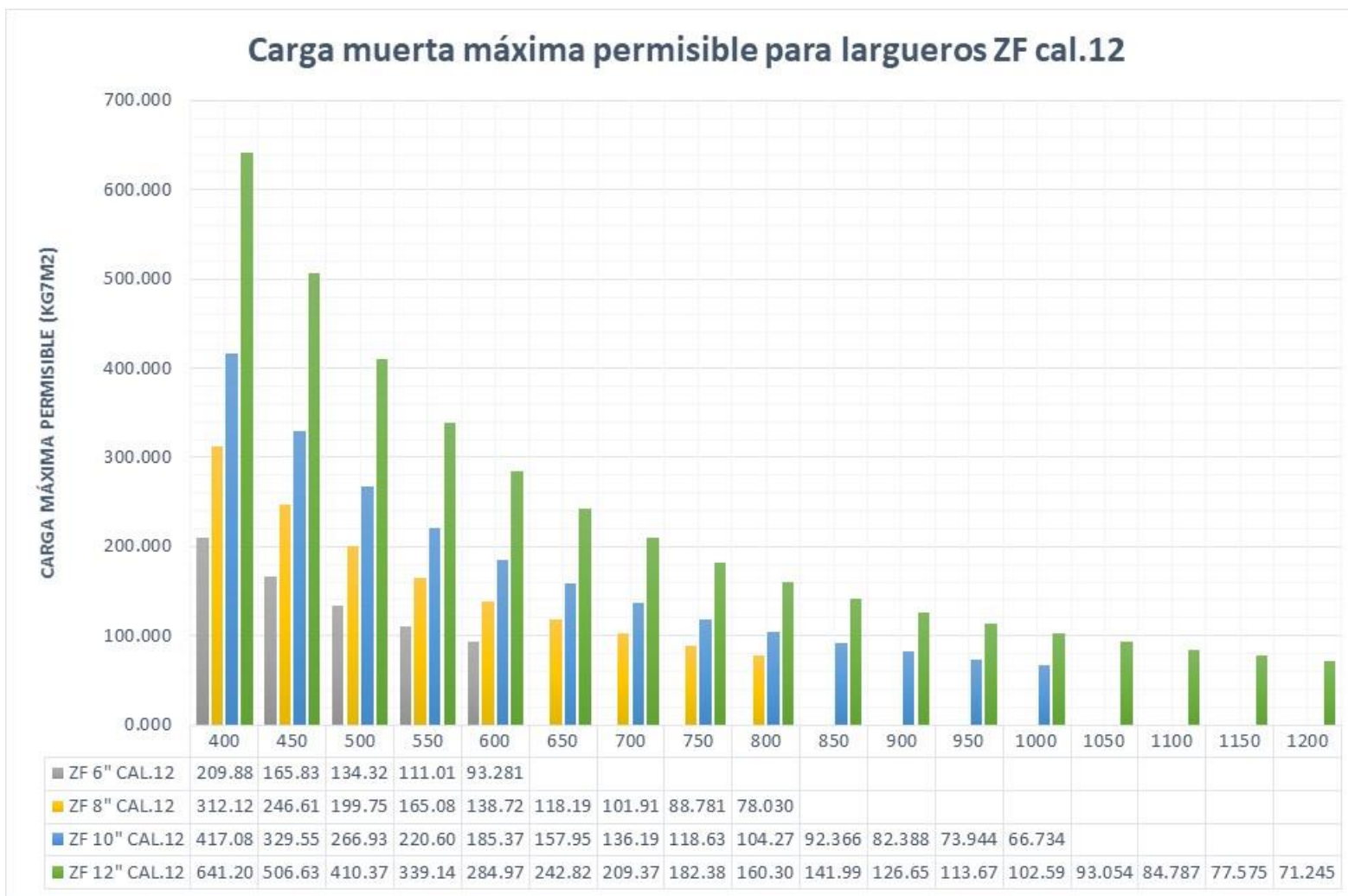


Gráfico. IV.4 Cargas máximas permisibles para largueros ZF cal. 12 (autoría propia, 2021).

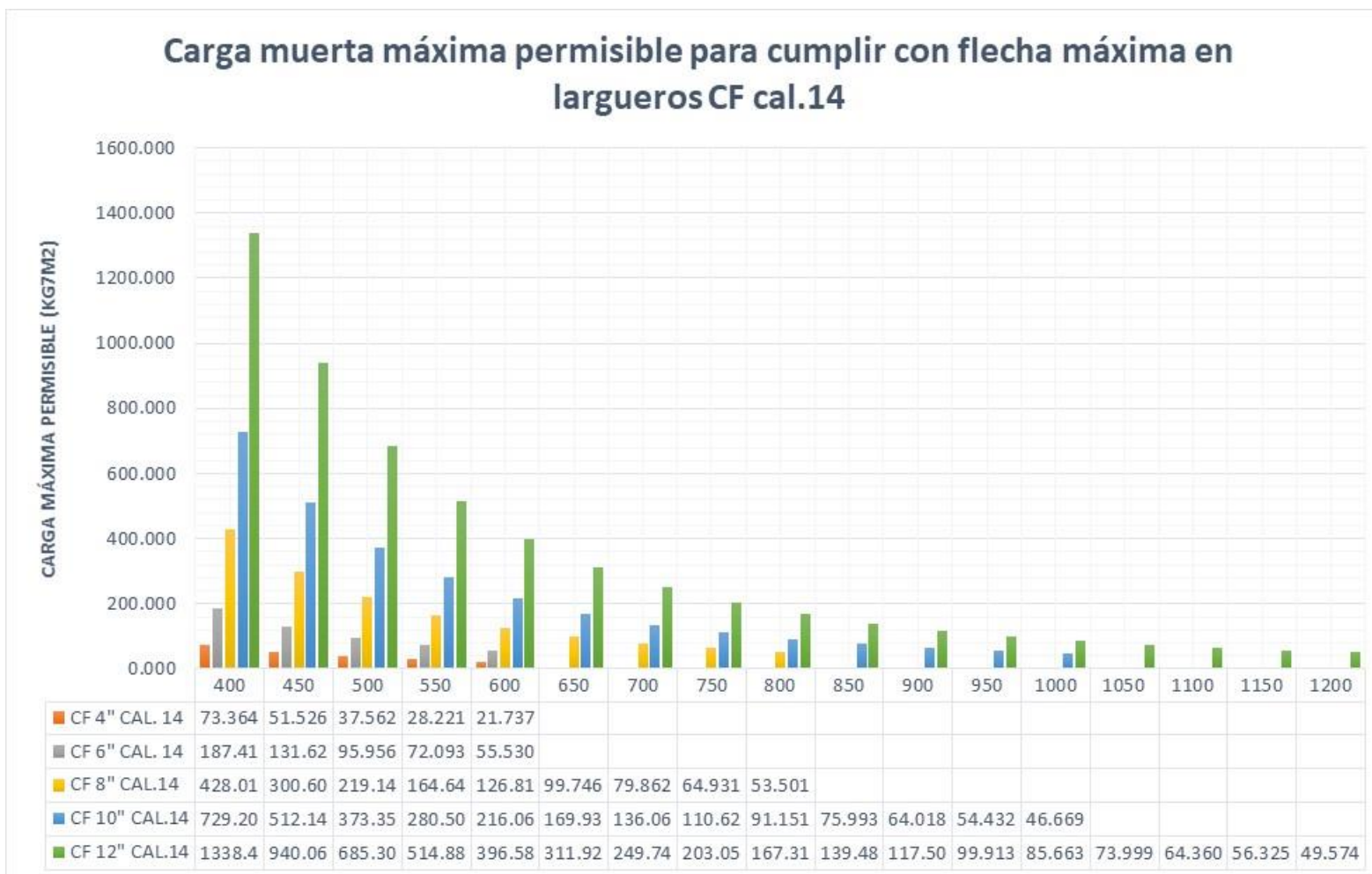
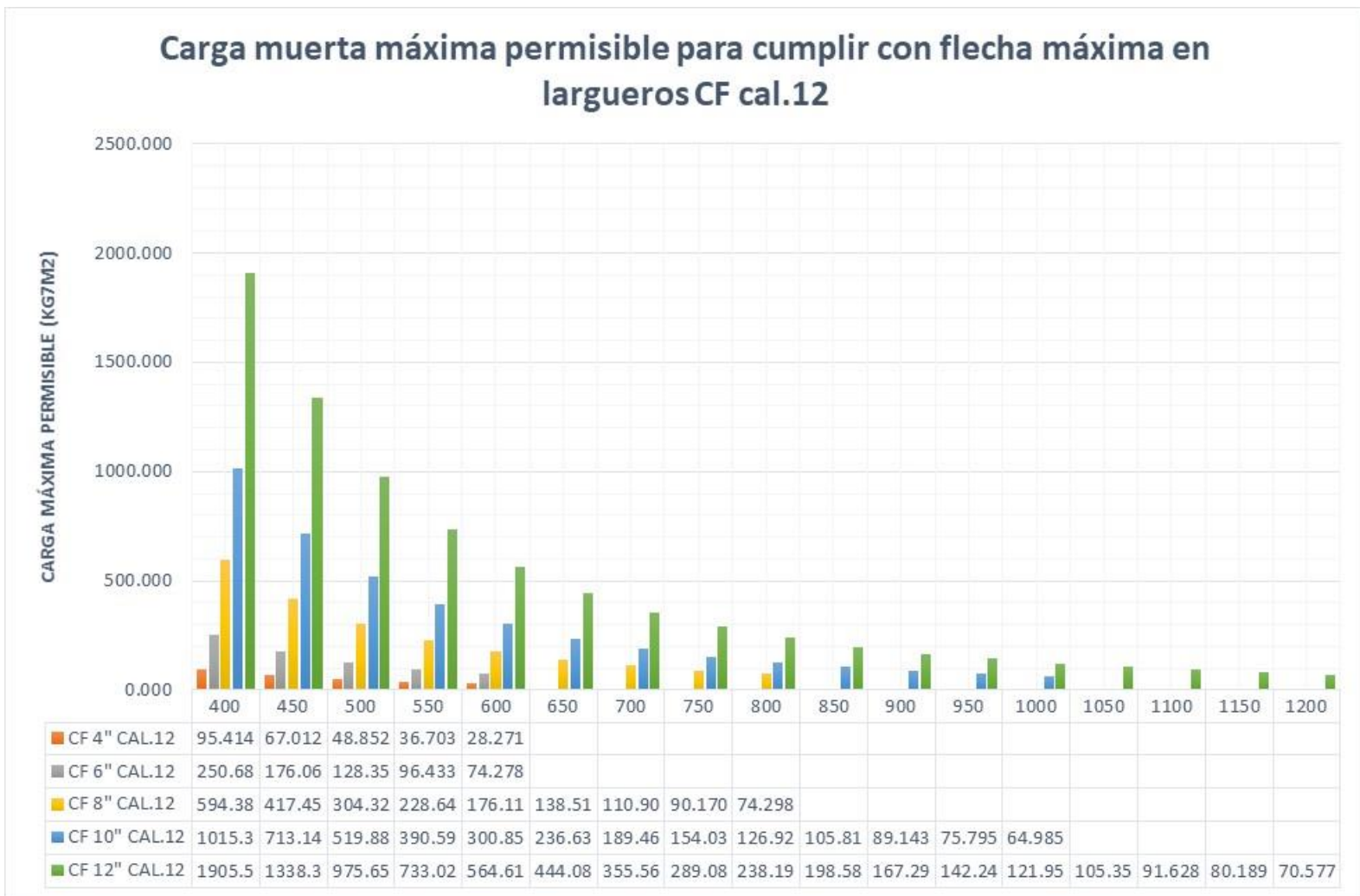


Gráfico. IV.5 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a L/240 largueros CF cal. 14 (autoría propia, 2021).



*Gráfico. IV.6 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a L/240 largueros CF cal. 12
(autoría propia, 2021).*

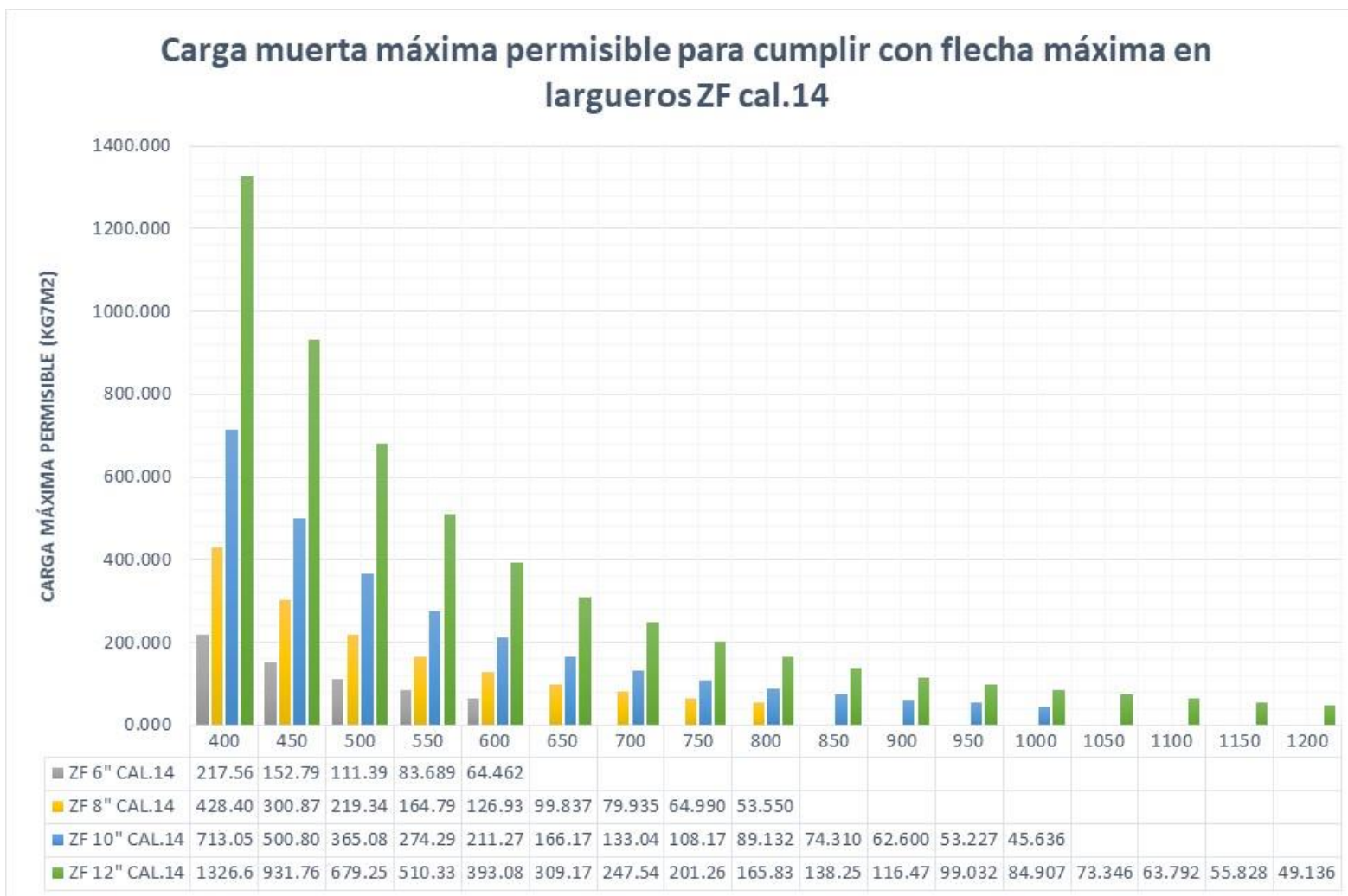


Gráfico. IV.7 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a $L/240$ largueros ZF cal. 14
(autoría propia, 2021).

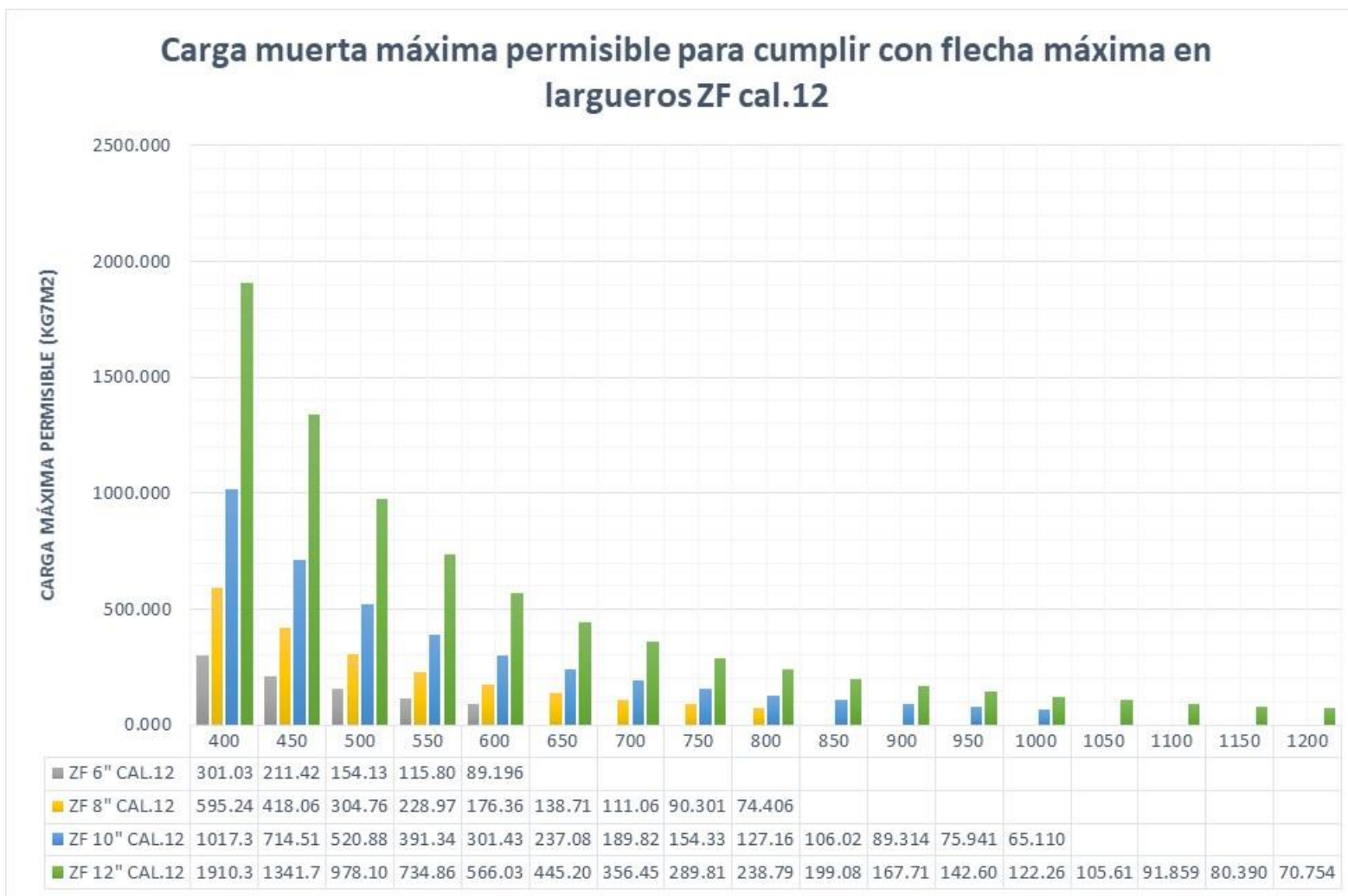


Gráfico. IV.8 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a $L/240$ largueros ZF cal. 12
(autoría propia, 2021).

IV.2.2.2 Largueros con un modelo de continuidad

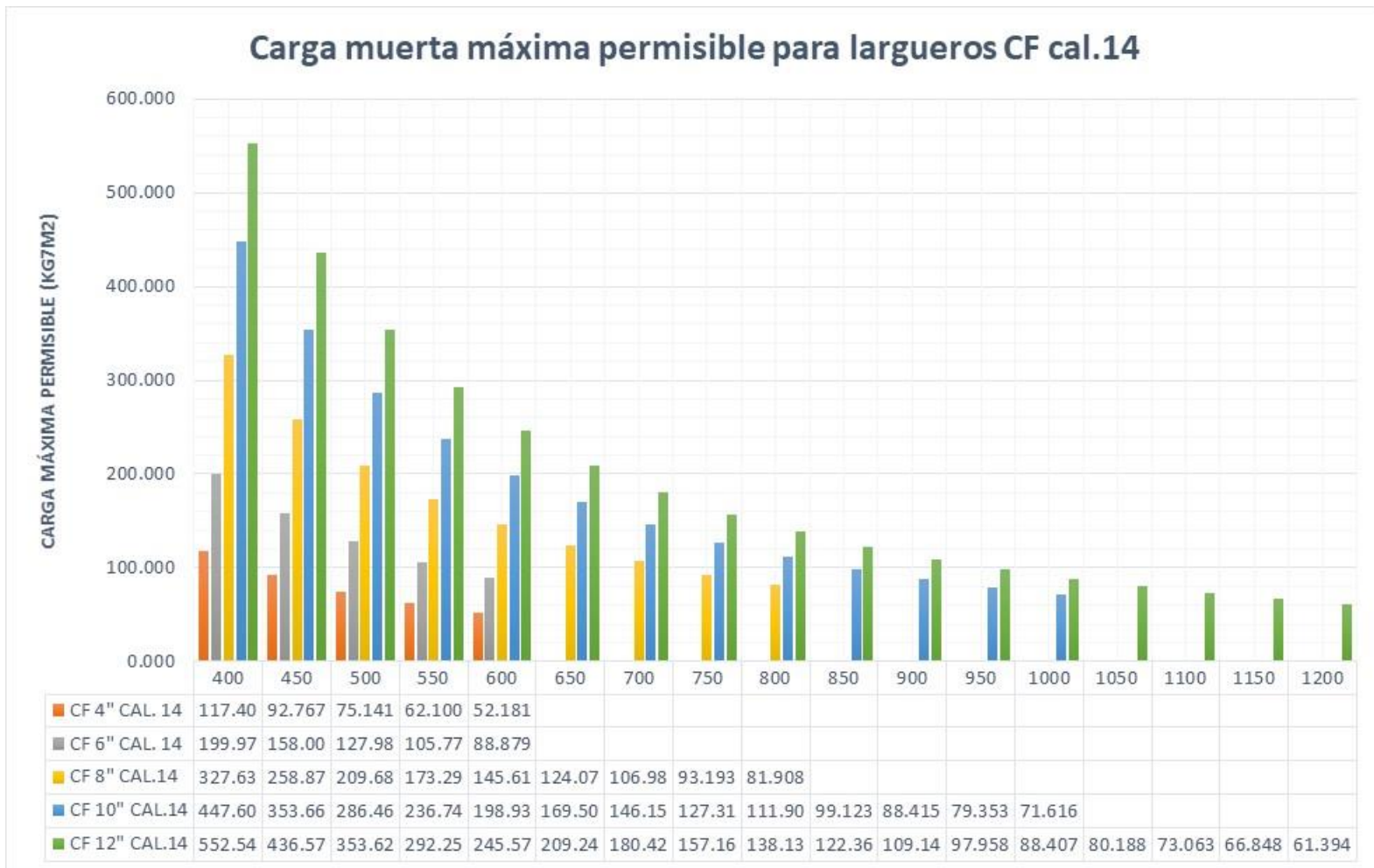


Gráfico. IV.9 Cargas máximas permisibles para largueros CF cal. 14 (autoría propia, 2021).

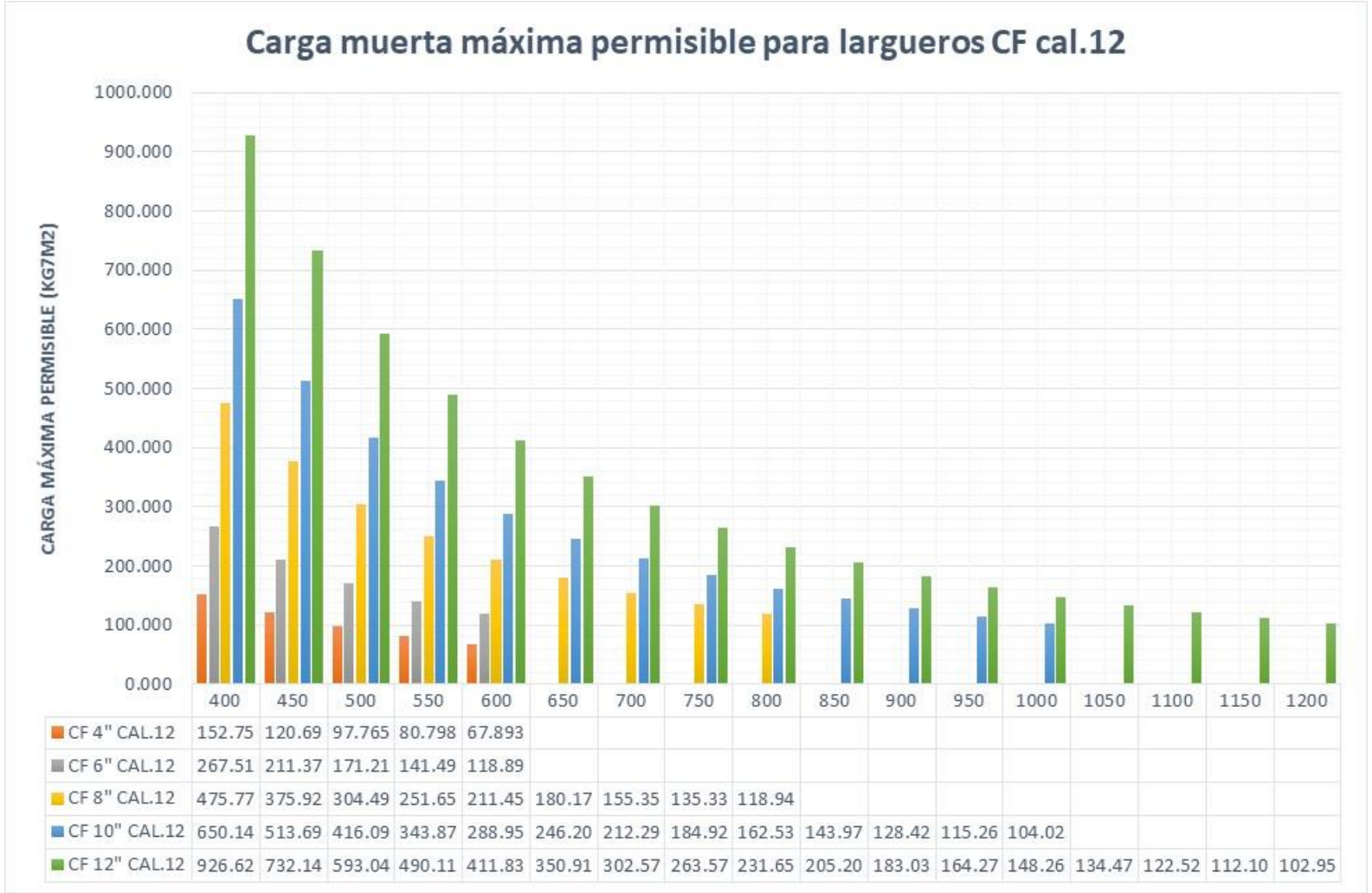


Gráfico. IV.10 Cargas máximas permisibles para largueros CF cal. 12 (autoría propia, 2021).

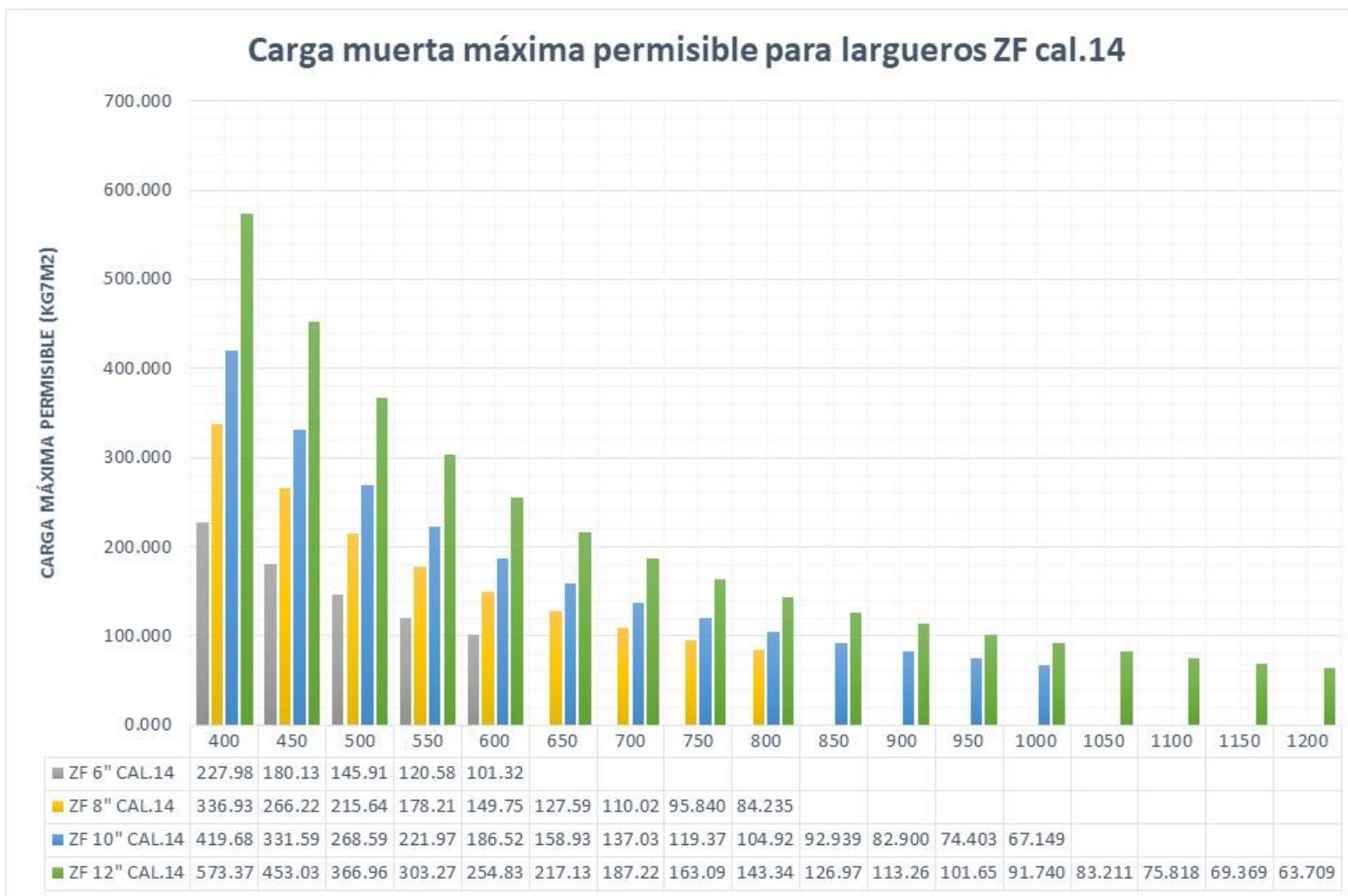


Gráfico. IV.11 Cargas máximas permisibles para largueros ZF cal. 14 (autoría propia, 2021).

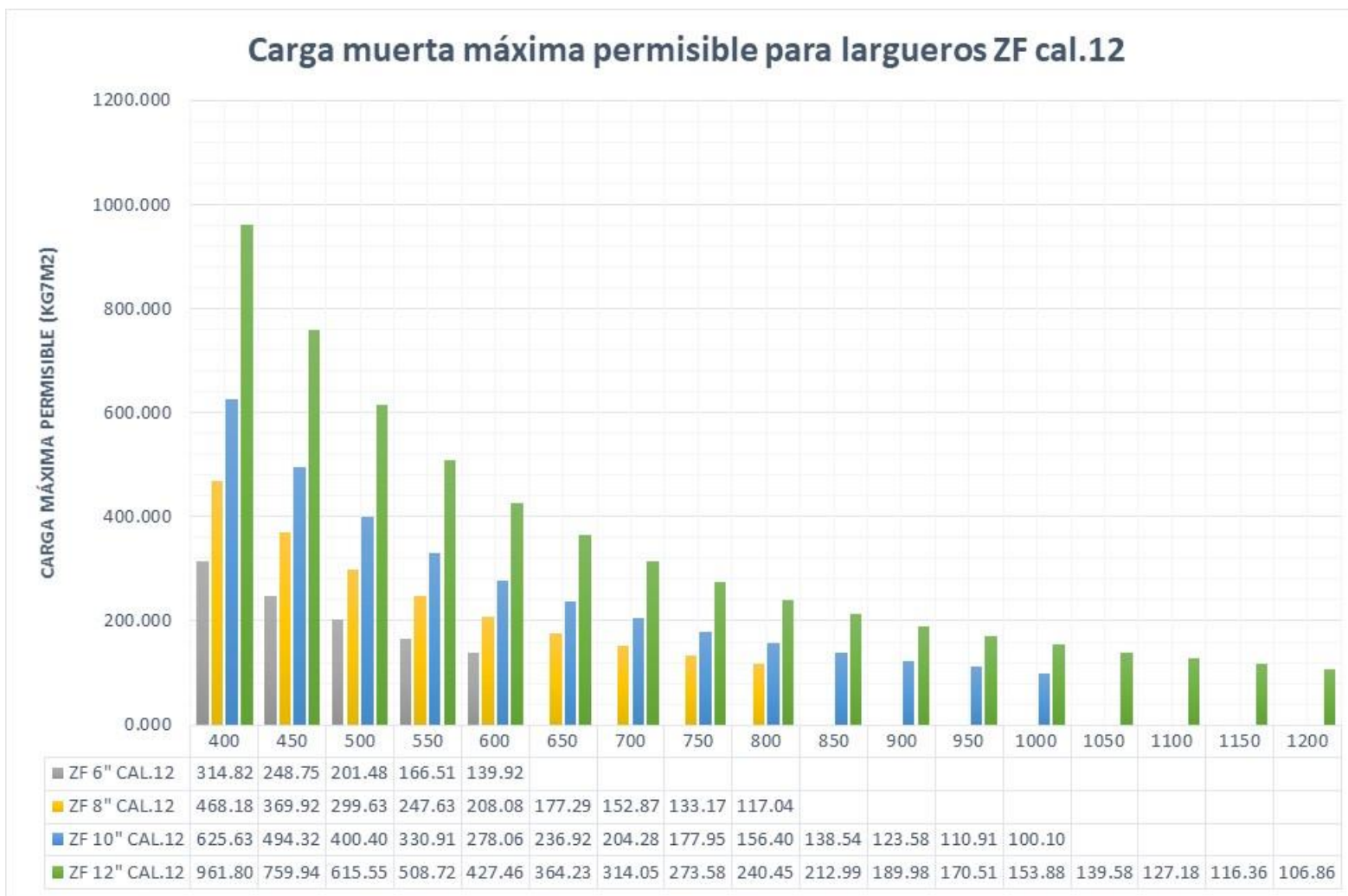


Gráfico. IV.12 Cargas máximas permisibles para largueros ZF cal. 12 (autoría propia, 2021).

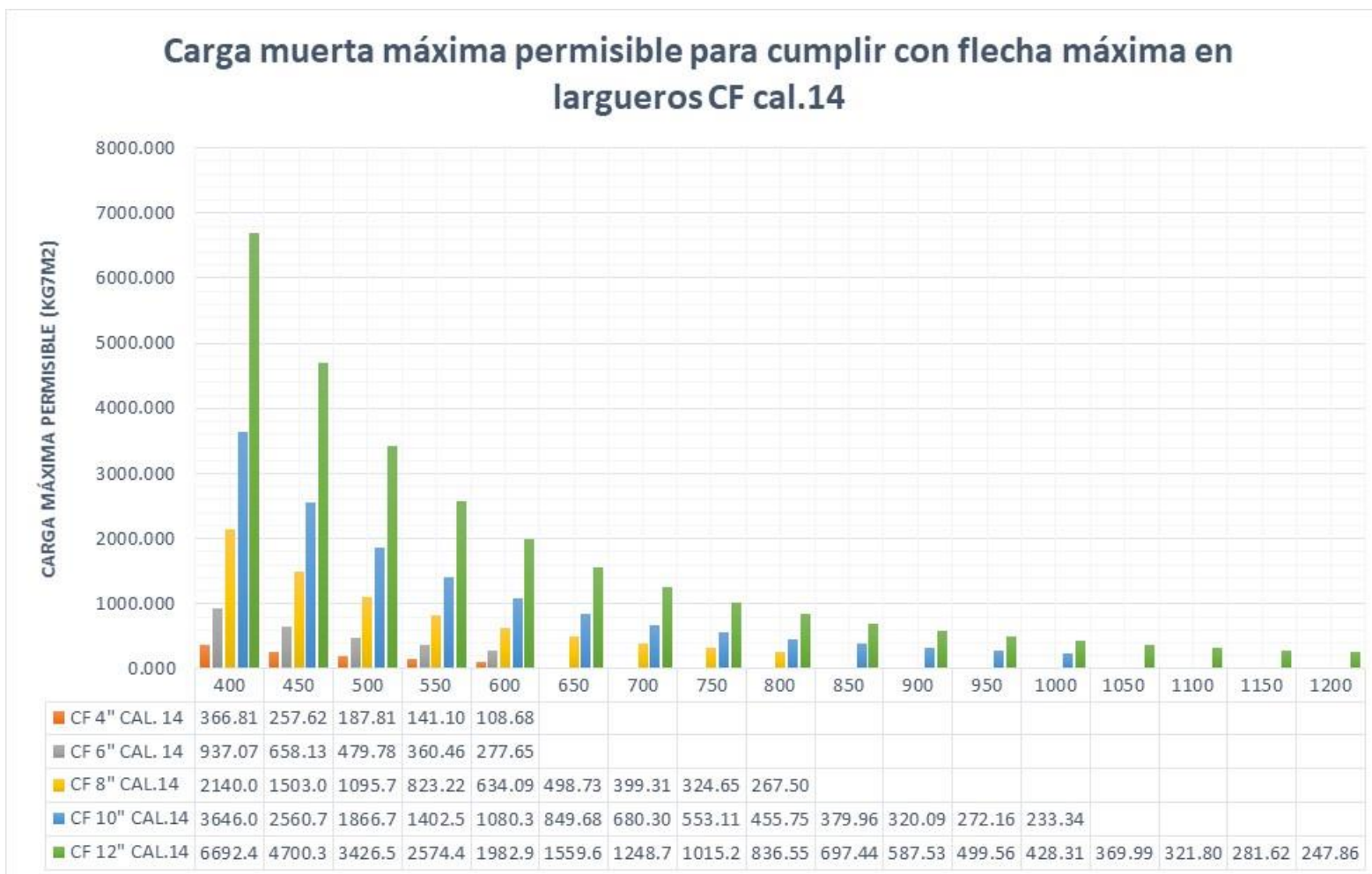
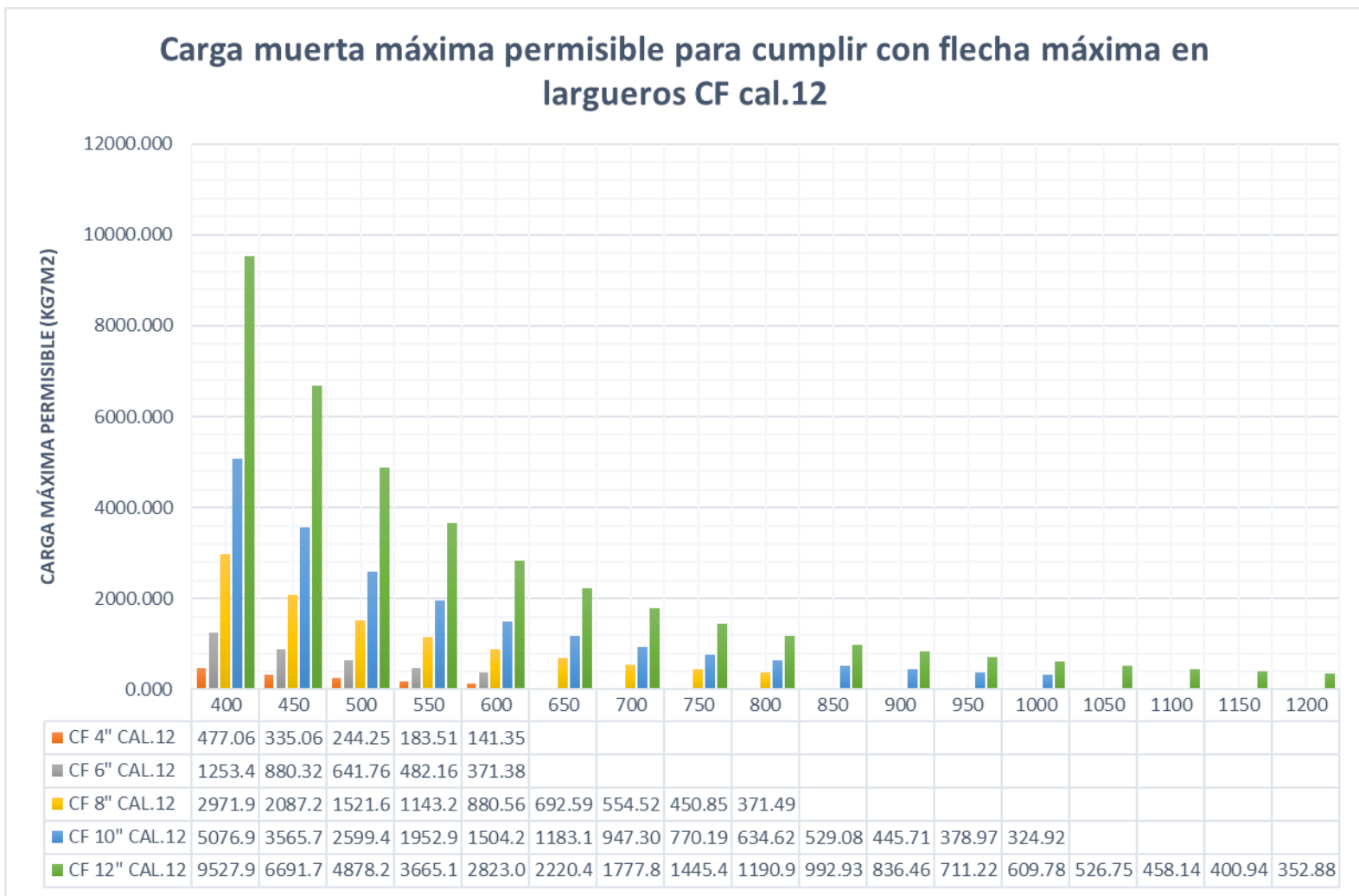
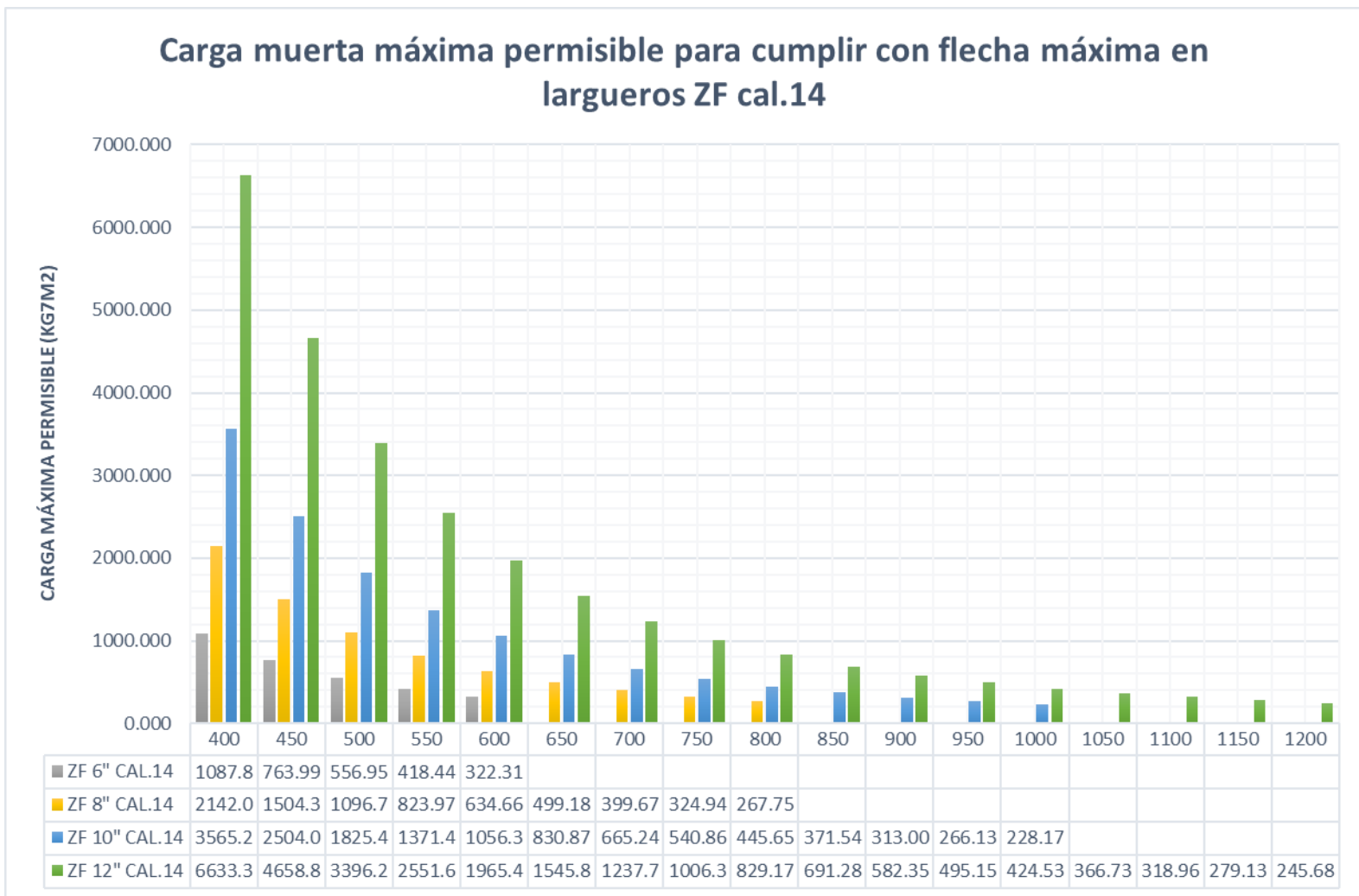


Gráfico. IV.13 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a $L/240$ largueros CF cal. 14
(autoría propia, 2021).



*Gráfico. IV.14 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a L/240 largueros CF cal. 12
(autoría propia, 2021).*



*Gráfico. IV.15 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a L/240 largueros ZF cal. 14
(autoría propia, 2021).*

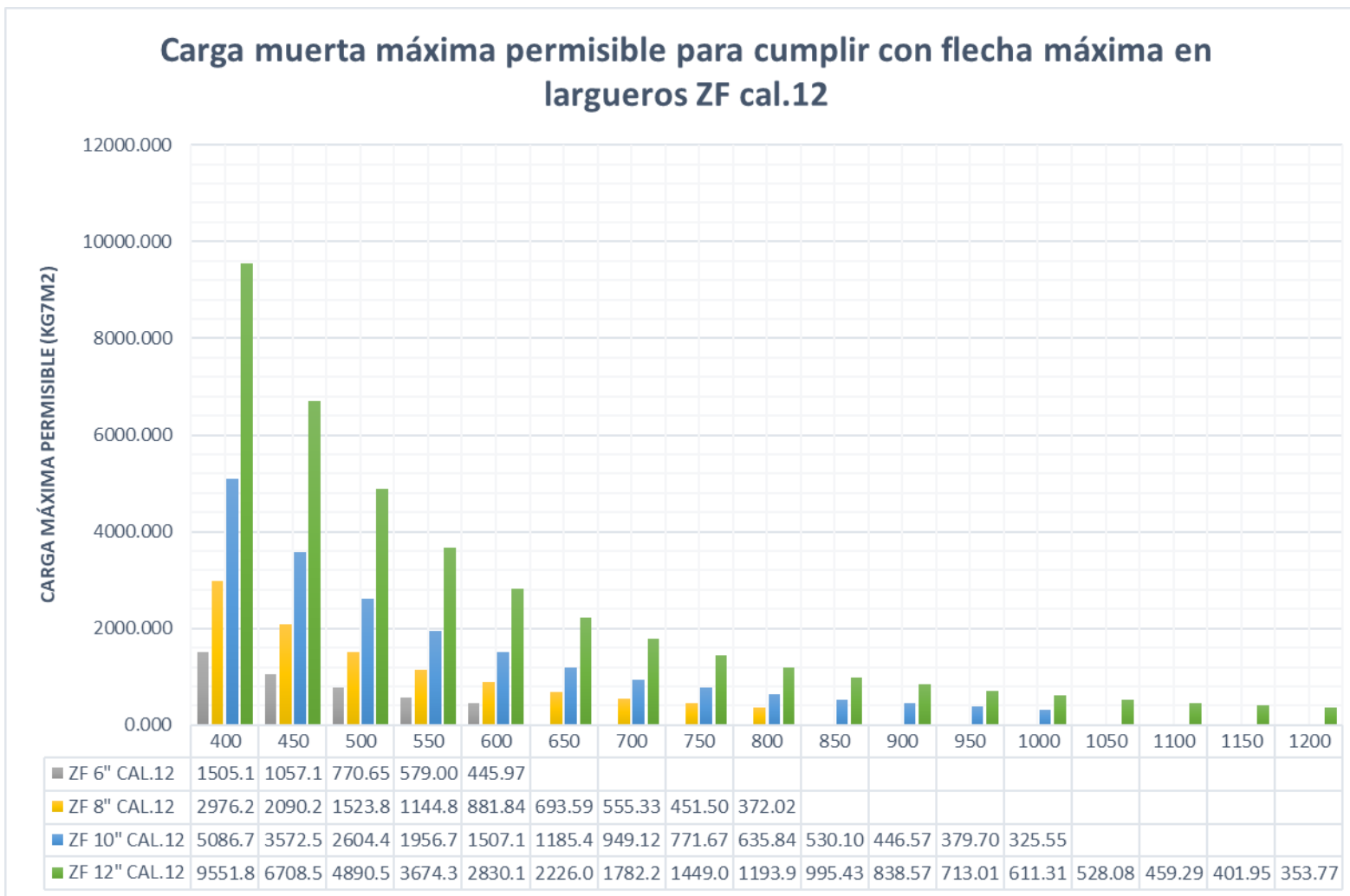


Gráfico. IV.16 Cargas máximas permisibles para cumplir con flecha igual a $L/240$ largueros ZF cal. 12
(autoría propia, 2021).

IV.2.2.3 Resultados para el sentido débil de los largueros

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	CF 4" CAL. 14			CF 6" CAL. 14		
cm	Wy (kg/m ²)			Wy (kg/m ²)		
400	31.252	39.065	36.509	29.259	36.574	34.182
450	24.693	30.866	28.847	23.119	28.898	27.008
500	20.001	25.001	23.366	18.726	23.408	21.876
550	16.530	20.662	19.311	15.476	19.345	18.080
600	13.890	17.362	16.226	13.004	16.255	15.192

Tabla. IV.7 Cargas máximas para largueros CF en sentido débil para 4" y 6" cal. 14 (autoría propia, 2021).

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	CF 8" CAL.14			CF 10" CAL.14		
cm	Wx (kg/m ²)			Wx (kg/m ²)		
400	43.718	54.648	51.073	44.572	55.715	52.070
450	34.543	43.179	40.354	35.218	44.022	41.142
500	27.980	34.975	32.687	28.526	35.658	33.325
550	23.124	28.905	27.014	23.575	29.469	27.541
600	19.430	24.288	22.699	19.810	24.762	23.142
650	16.556	20.695	19.341	16.879	21.099	19.719
700	14.275	17.844	16.677	14.554	18.193	17.003
750	12.435	15.544	14.527	12.678	15.848	14.811
800	10.930	13.662	12.768	11.143	13.929	13.018
850				9.871	12.338	11.531
900				8.804	11.006	10.286
950				7.902	9.878	9.231

Tabla. IV.8 Cargas máximas para largueros CF en sentido débil para 8" y 10" cal. 14 (autoría propia, 2021).

Carga máxima permisible por momento máximo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
CF 12" CAL.14		
Wx (kg/m ²)		
76.507	95.634	89.378
60.450	75.563	70.619
48.965	61.206	57.202
40.467	50.583	47.274
34.003	42.504	39.723
28.973	36.216	33.847
24.982	31.227	29.185
21.762	27.203	25.423
19.127	23.909	22.344
16.943	21.178	19.793
15.113	18.891	17.655
13.564	16.955	15.845
12.241	15.301	14.300
11.103	13.879	12.971
10.117	12.646	11.819
9.256	11.570	10.813
8.501	10.626	9.931

Tabla. IV.9 Cargas máximas para largueros CF en sentido débil para 12" cal. 14 (autoría propia, 2021).

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	CF 4" CAL. 12			CF 6" CAL. 12		
cm	Wy (kg/m ²)			Wy (kg/m ²)		
400	36.147	45.184	42.228	37.855	47.319	44.223
450	28.561	35.701	33.366	29.910	37.388	34.942
500	23.134	28.918	27.026	24.227	30.284	28.303
550	19.119	23.899	22.336	20.023	25.028	23.391
600	16.066	20.082	18.768	16.825	21.031	19.655

Tabla. IV.10 Cargas máximas para largueros CF en sentido débil para 4" v 6" cal. 12 (autoría propia. 2021).

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	CF 8" CAL.12			CF 10" CAL.12		
cm	Wx (kg/m ²)			Wx (kg/m ²)		
400	59.714	74.643	69.760	63.471	79.339	74.149
450	47.182	58.977	55.119	50.150	62.688	58.587
500	38.217	47.771	44.646	40.622	50.777	47.455
550	31.584	39.481	36.898	33.572	41.965	39.219
600	26.540	33.175	31.004	28.210	35.262	32.955
650	22.614	28.267	26.418	24.036	30.046	28.080
700	19.499	24.373	22.779	20.725	25.907	24.212
750	16.985	21.232	19.843	18.054	22.568	21.091
800	14.929	18.661	17.440	15.868	19.835	18.537
850				14.056	17.570	16.420
900				12.538	15.672	14.647
950				11.253	14.066	13.145
1000				10.155	12.694	11.864

Tabla. IV.11 Cargas máximas para largueros CF en sentido débil para 8" y 10" cal. 12 (autoría propia, 2021).

Carga máxima permisible por momento máximo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
CF 12" CAL.12		
Wx (kg/m ²)		
108.898	136.122	127.217
86.042	107.553	100.517
69.694	87.118	81.419
57.599	71.998	67.288
48.399	60.499	56.541
41.239	51.549	48.177
35.558	44.448	41.540
30.975	38.719	36.186
27.224	34.030	31.804
24.116	30.145	28.173
21.511	26.888	25.129
19.306	24.132	22.554
17.424	21.780	20.355
15.804	19.755	18.462
14.400	18.000	16.822
13.175	16.468	15.391
12.100	15.125	14.135

Tabla. IV.12 Cargas máximas para largueros CF en sentido débil para 12" cal. 12 (autoría propia, 2021).

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	ZF 6" CAL. 14			ZF 8" CAL.14		
cm	Wy (kg/m ²)			Wx (kg/m ²)		
400	44.629	55.787	52.137	44.515	55.644	52.004
450	35.263	44.078	41.195	35.173	43.966	41.090
500	28.563	35.703	33.368	28.490	35.612	33.283
550	23.606	29.507	27.577	23.545	29.432	27.506
600	19.835	24.794	23.172	19.785	24.731	23.113
650				16.858	21.072	19.694
700				14.536	18.170	16.981
750				12.662	15.828	14.792
800				11.129	13.911	13.001

Tabla. IV.13 Cargas máximas para largueros ZF en sentido débil para 6" y 8" cal. 14 (autoría propia, 2021).

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	ZF 6" CAL. 12			ZF 8" CAL.12		
cm	Wy (kg/m ²)			Wx (kg/m ²)		
400	63.358	79.197	74.016	63.130	78.912	73.750
450	50.060	62.575	58.482	49.880	62.350	58.271
500	40.549	50.686	47.370	40.403	50.504	47.200
550	33.511	41.889	39.149	33.391	41.739	39.008
600	28.159	35.199	32.896	28.058	35.072	32.778
650				23.907	29.884	27.929
700				20.614	25.767	24.082
750				17.957	22.446	20.978
800				15.782	19.728	18.437

Tabla. IV.14 Cargas máximas para largueros ZF en sentido débil para 6" y 8" cal. 12 (autoría propia, 2021).

Longitud del larguero	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima permisible por momento máximo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	ZF 10" CAL.14			ZF 12" CAL.14		
cm	Wx (kg/m ²)			Wx (kg/m ²)		
400	44.402	55.502	51.871	78.898	98.623	92.171
450	35.083	43.853	40.984	62.339	77.924	72.826
500	28.417	35.521	33.197	50.495	63.118	58.989
550	23.485	29.356	27.436	41.731	52.164	48.751
600	19.734	24.668	23.054	35.066	43.832	40.965
650	16.815	21.018	19.643	29.879	37.348	34.905
700	14.498	18.123	16.937	25.763	32.203	30.097
750	12.630	15.787	14.754	22.442	28.053	26.217
800	11.100	13.875	12.968	19.725	24.656	23.043
850	9.833	12.291	11.487	17.472	21.840	20.411
900	8.771	10.963	10.246	15.585	19.481	18.207
950	7.872	9.840	9.196	13.987	17.484	16.340
1000	7.104	8.880	8.299	12.624	15.780	14.747
1050				11.450	14.313	13.376
1100				10.433	13.041	12.188
1150				9.545	11.932	11.151
1200				8.766	10.958	10.241

Tabla. IV.15 Cargas máximas para largueros ZF en sentido débil para 10" y 12" cal. 14 (autoría propia, 2021).

Longitud del larguero cm	Carga máxima con una línea de contraflambreo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo	Carga máxima permisible por momento máximo	Carga máxima con dos líneas de contraflambreo	Carga máxima con tres líneas de contraflambreo
	ZF 10" CAL.12			ZF 12" CAL.12		
	Wx (kg/m ²)			Wx (kg/m ²)		
400	63.016	78.770	73.617	111.687	139.609	130.475
450	49.790	62.238	58.166	88.246	110.308	103.092
500	40.330	50.413	47.115	71.480	89.349	83.504
550	33.331	41.663	38.938	59.074	73.843	69.012
600	28.007	35.009	32.719	49.639	62.048	57.989
650	23.864	29.830	27.879	42.296	52.870	49.411
700	20.577	25.721	24.038	36.469	45.586	42.604
750	17.925	22.406	20.940	31.769	39.711	37.113
800	15.754	19.692	18.404	27.922	34.902	32.619
850	13.955	17.444	16.303	24.733	30.917	28.894
900	12.448	15.560	14.542	22.062	27.577	25.773
950	11.172	13.965	13.051	19.800	24.751	23.131
1000	10.083	12.603	11.779	17.870	22.337	20.876
1050				16.209	20.261	18.935
1100				14.769	18.461	17.253
1150				13.512	16.890	15.785
1200				12.410	15.512	14.497

Tabla. IV.16 Cargas máximas para largueros ZF en sentido débil para 8" y 10" cal. 12 (autoría propia, 2021).

IV.3. COMPARATIVA ENTRE UN LARGUERO SIMPLEMENTE APOYADO Y OTRO CON CONTINUIDAD

Como se puede observar en las gráficas, un larguero con continuidad genera muchas ventajas, puede resistir más carga en un mayor claro para conseguir el límite de deformación permisible, además, desde el punto de vista económico, significa que se pueden usar largueros de menor peralte en una solución estructural, arrojando menor densidad de acero en compra.

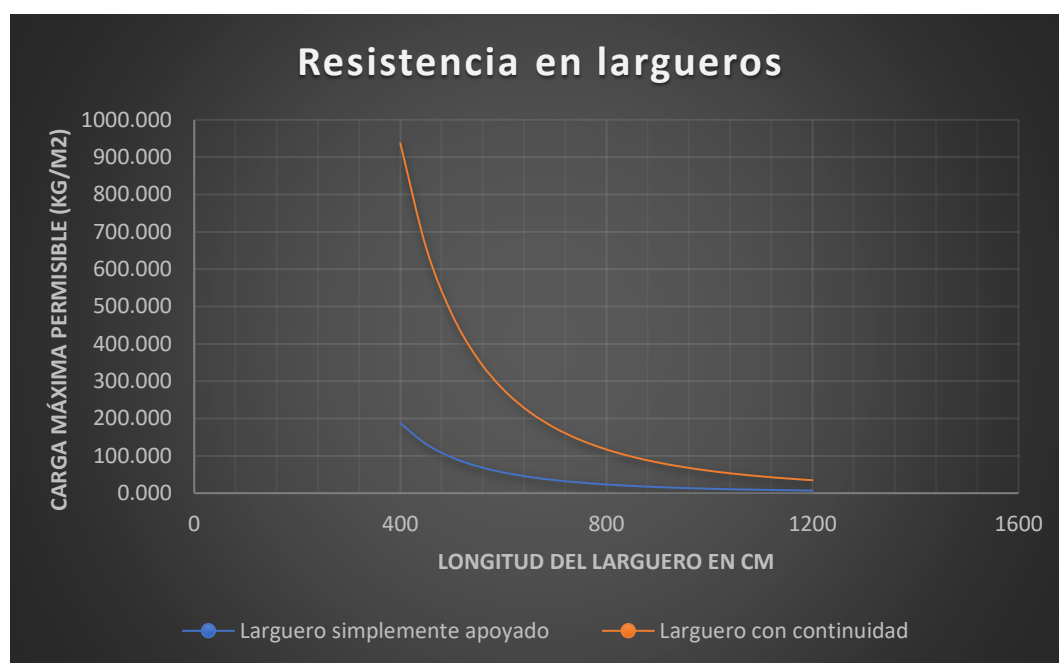


Gráfico. IV.17 Comparativa de la capacidad de carga entre los dos modelos analizados.

En todos los casos la capacidad de carga para un modelo doblemente empotrado aumenta 5 veces, lo que representa un 20%.

Una ventaja importante en empotrar o darle continuidad a los largueros es la funcionalidad ante una sobrecarga, al presentarse un peso concentrado como el granizo en una zona específica, los montenes comenzarán a flecharse, si este peso sobrepasa la capacidad de carga calculada se espera que la flecha sea considerable, sin embargo, al tener a los extremos dos elementos que lo estén

“jalando”, evitará que esa zona colapse, por lo menos en un periodo de tiempo más largo, dando oportunidad de remover el peso, salvando todo aquello que el techo resguarde.



Fig. IV.8 Ejemplo de continuidad de largueros de perfil ZF en nave industrial (autoría propia, 2021).

Ejemplo de traslape de larguero en Z ayudando al no colapso por sobrecarga de granizo apoyándose del claro continuo. Obsérvese que al centro los polines se muestran doblados y a los extremos existe un aplastamiento notable.

En este ejemplo, los largueros se traslaparon 50 cm colocando 4 tornillos en las almas, además de su correspondiente clip hacia el patín del pórtico principal. Por su geometría, los largueros en Z embonan bien uno con el otro, lo que no se logra con facilidad en perfiles en C.

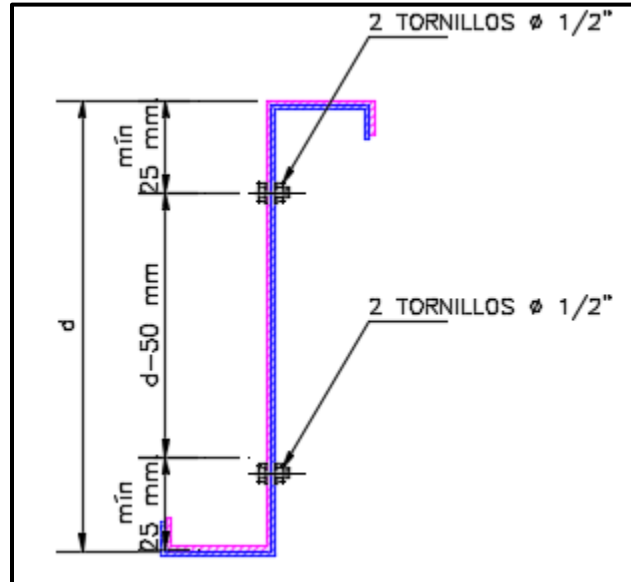


Fig. IV.9 Traslape de perfiles ZF, vista transversal (autoría propia, 2021).

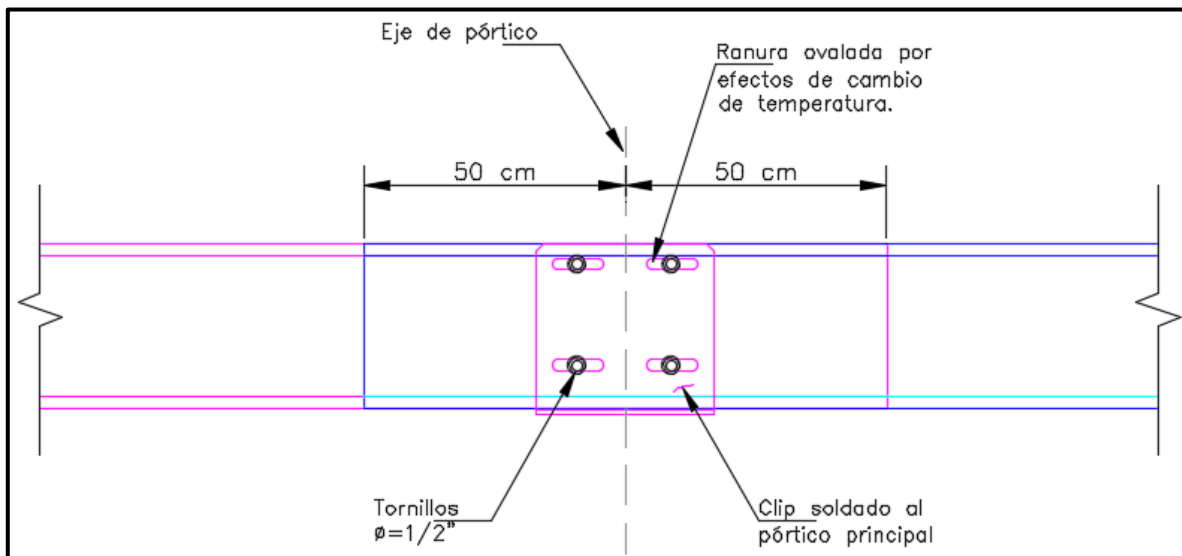


Fig. IV.10 Traslape de perfiles ZF, vista lateral (autoría propia, 2021).

Para el caso de perfiles CF he observado en varias naves que realizan el traslape espalda con espalda garantizando al igual que los perfiles ZF tener doble alma en el eje de los pórticos principales que aporten a contrarrestar el momento negativo generado.

Traslape de largueros espalda con espalda en perfiles en C



Fig. IV.11 Ejemplo de continuidad de largueros CF en nave industrial (autoría propia, 2021).

En este ejemplo, para un claro de 10 m se están utilizando perfiles de 12", consiguiendo un traslape de 1.00 m

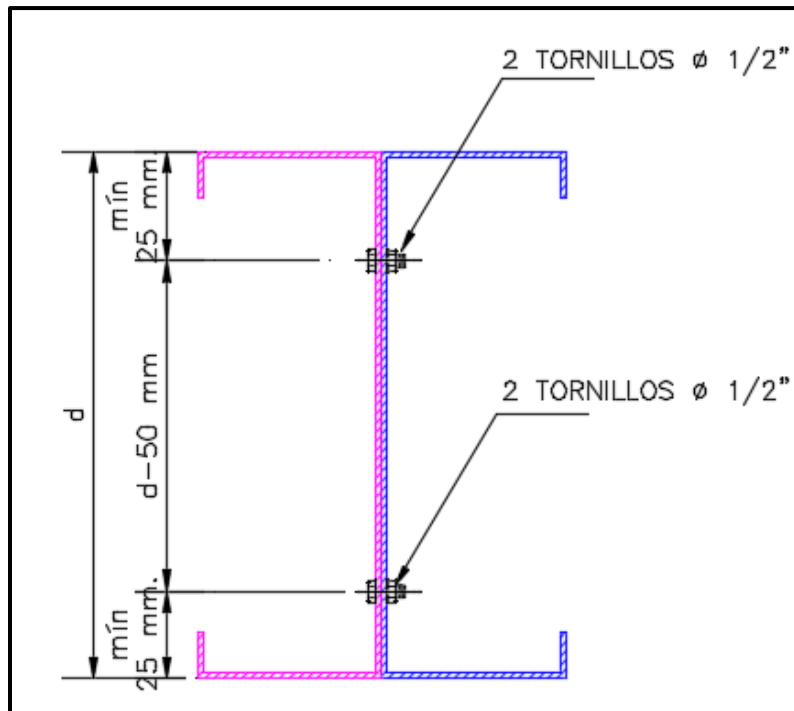


Fig. IV.12 Traslape de perfiles ZF, vista transversal (autoría propia, 2021).

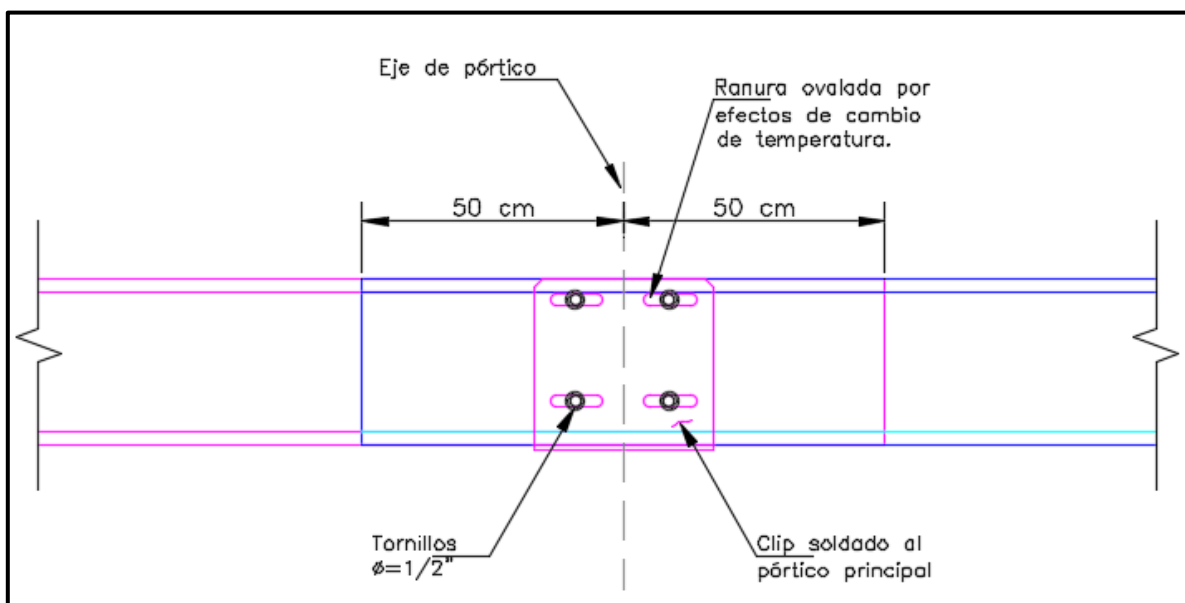


Fig. IV.13 Traslape de perfiles ZF, vista lateral (autoría propia, 2021).

Es importante mencionar que los largueros comerciales vienen en longitudes estándar por lo que decidir darle continuidad de por mínimo 50 cm se tendrá que proponer ejes de marcos principales a un metro menor que la longitud máxima comercial. Existen empresa dedicadas a la proyección, fabricación y construcción de naves industriales que cuentan con la maquinaria adecuada, estas empresas adquieren los rollos de lámina galvanizada y es fácil elaborar elementos de longitudes mayores a las comerciales, y al no depende de éstas, pueden proponer separaciones mayores.

Estas son las longitudes comerciales que se pueden encontrar con facilidad en catálogos de proveedores a nivel nacional como lo son: Fortacero, Aceromex y Ferrebarniedo por mencionar algunos.

Polín en C o Z	Longitud comercial (m)
4"	4 y 6
6"	4 y 6
8"	8
10"	10
12"	12

Tabla. IV.17 Longitudes comerciales para largueros de diferentes peraltes (autoría propia, 2021).

En caso de requerir por diseño largueros dobles o también llamados elementos en caja, se proponen los siguiente arreglos:

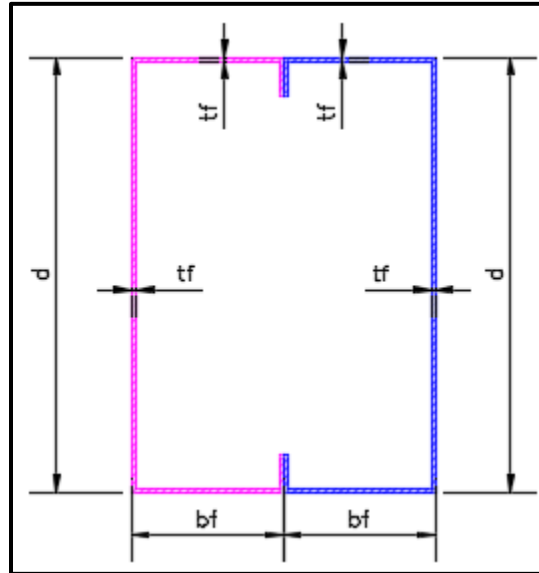


Fig. IV.14 Propuesta larguero CF en caja (autoría propia, 2021).

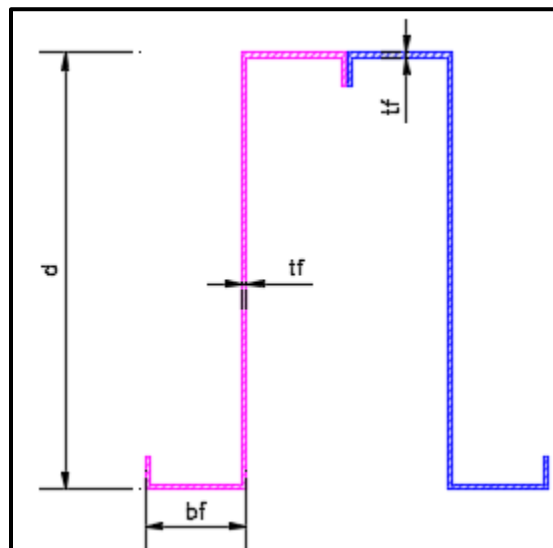


Fig. IV.15 Propuesta larguero ZF en caja (autoría propia, 2021).

IV.4. CONCLUSIONES

1. Se analizaron peraltes y perfiles de largueros de uso frecuente en la encontrarlos en catálogos de proveedores de acero.
2. Para perfiles distintos como los propuestos y fabricados por constructores, se deberá realizar su análisis correspondiente.
3. Por lo general en naves industriales la separación entre pórticos principales es entre los 8 y 12 metros de separación, por lo que perfiles de 8" de peralte o más son recomendados.
4. Como vimos, una condición de continuidad de los largueros ayuda en muchos aspectos como:
 - a. Reducir la deformación al centro del claro
 - b. Aumenta hasta un 20% la resistencia
 - c. Resiste mayor carga por metro cuadrado
 - d. Uso de menor peralte en comparación con largueros sin continuidad
 - e. Al resistir mayor carga se pueden colocar a mayor separación
5. Se generan ayudas mediante tablas y gráficos de fácil interpretación, obteniendo de ellas valores importantes para el usuario como:
 - a. Capacidad de carga para no rebasar el momento resistente en dirección del eje fuerte
 - b. Capacidad de carga para no rebasar el momento resistente en dirección del eje débil
 - c. Capacidad de carga para no rebasar el límite de deformación al centro del claro de $L/240$
 - d. Resultados para distintas variables como separación entre pórticos, peraltes y calibre de los polines.
6. Los largueros de perfil ZF presentan mejores propiedades físicas geométricas que significan una ventaja en comparación con los CF conservando el mismo peso por metro línea.
7. Los largueros en ZF por lo general son galvanizados, lo que significa que no necesitan una mano de pintura para protección contra la corrosión.

CAPÍTULO V. EJEMPLOS

Se realizarán unos ejemplos del cálculo de la sobrecarga de granizo para diferentes condiciones de cubierta y recomendando los largueros ideales para soportar dicho peso.

V.1. Ejemplo de cubierta a una sola agua con faldón recto en sus extremos

Para una cubierta a un agua con un ángulo de inclinación y que mide 18 m de longitud, calcular la sobrecarga del granizo, así como la longitud de ésta.

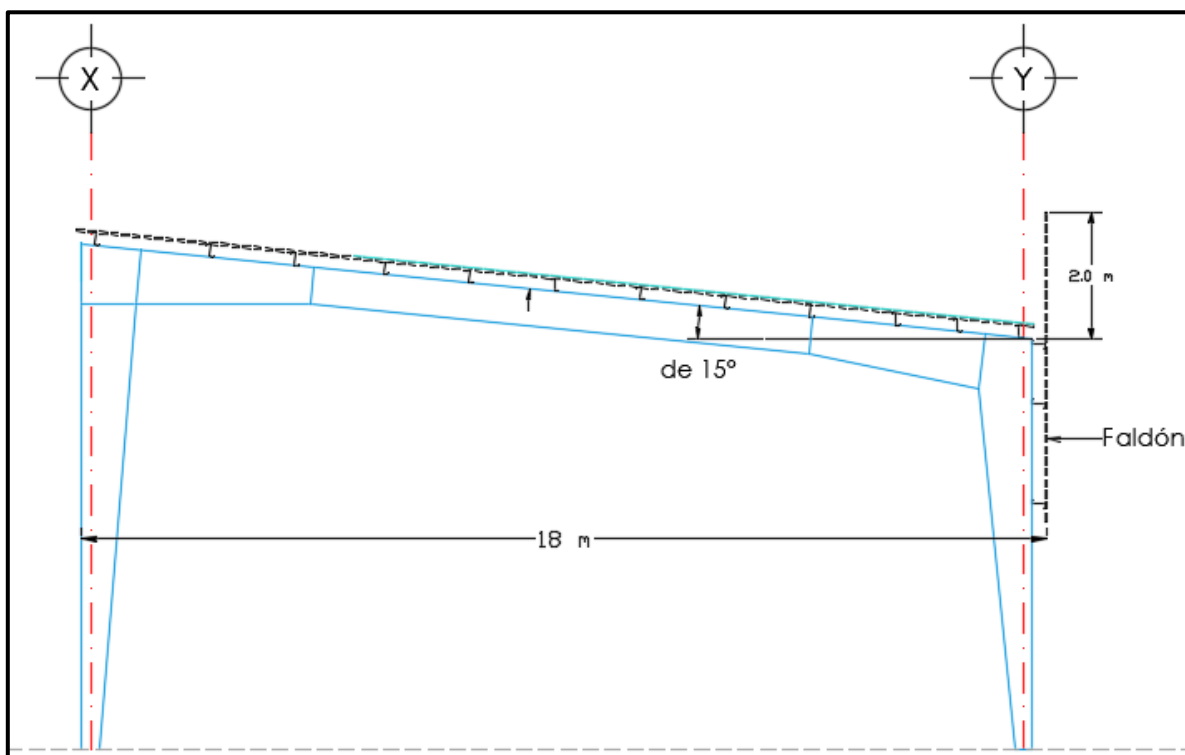


Fig. V.1 Esquema del representativo del problema (autoría propia, 2021).

a) Cálculo de la longitud de la sobrecarga:

Con ayuda del gráfico III.1 o del anexo 1 se determina que la longitud que se deberá considerar con sobrecarga por granizo es el 50% del total, es decir, 9 m para este ejemplo medidos desde la parte más baja de la cubierta.

b) Cálculo del peso de sobrecarga:

Con base en la tabla III.5. se obtienen los siguientes resultados:

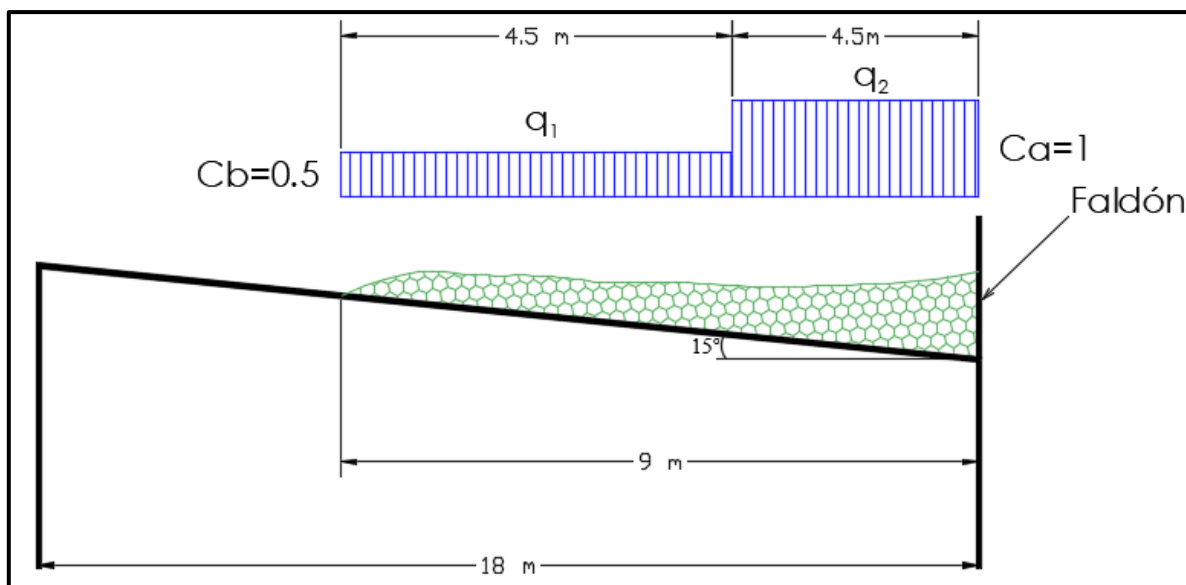


Fig. V.2 Esquema de cargas del problema (autoría propia, 2021).

$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * 1 = 350 kg/m^2$$

$$q_2 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * 0.5 = 175 kg/m^2$$

c) Largueros que soportan la sobrecarga

Considerando una longitud del larguero de 8 m y una carga muerta de 15 kg/m² de la bajada de cargas se sugieren los siguientes largueros:

$$q_{1total} = 350 \frac{kg}{m^2} + 15 \frac{kg}{m^2} = 365 \frac{kg}{m^2}$$

$$q_{2total} = 175 \frac{kg}{m^2} + 15 \frac{kg}{m^2} = 190 \frac{kg}{m^2}$$

Con base en la figura IV.3 las componentes de carga para q1 serían igual a:

$$W_x = 365 \frac{kg}{m^2} * \cos(15^\circ) = 352.56 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_y = 365 \frac{kg}{m^2} * \sin(15^\circ) = 94.46 \frac{kg}{m^2}$$

Por la magnitud de la carga se proponen una separación de largueros de 80 cm en esta zona:

$$W_x = 365 \frac{kg}{m^2} * \cos(15^\circ) = 352.56 \frac{kg}{m^2} * .80 = 282.05 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_y = 365 \frac{kg}{m^2} * \sin(15^\circ) = 94.46 \frac{kg}{m^2} * 80 = 75.56 \frac{kg}{m^3}$$

Se proponen dos líneas de contraflambeos y largueros con continuidad.

Cálculo de los momentos actuantes:

$$W_{ax} = \frac{282.05 \frac{kg}{m} * 8^2}{12} = 1504.27 \text{ kg} - m$$

$$W_{ay} = \frac{75.56 \frac{kg}{m} * 8^2}{12} = 402.98 \text{ kg} - m$$

De la tabla IV.6 se elige un perfil ZF 12" cal. 14 en caja, por lo que se tienen los siguientes resultados:

$$\frac{1504.27 \text{ kg} - m}{3058.04 \text{ kg} - m} + \frac{402.98 \text{ kg} - m}{631.18 \text{ kg} - m} = 1.13$$

Como la relación es mayor a 1, estrictamente se debe cambiar de perfil o bien, reducir la separación entre largueros.

V.2. Ejemplo de cubierta a dos aguas con faldón recto en sus extremos

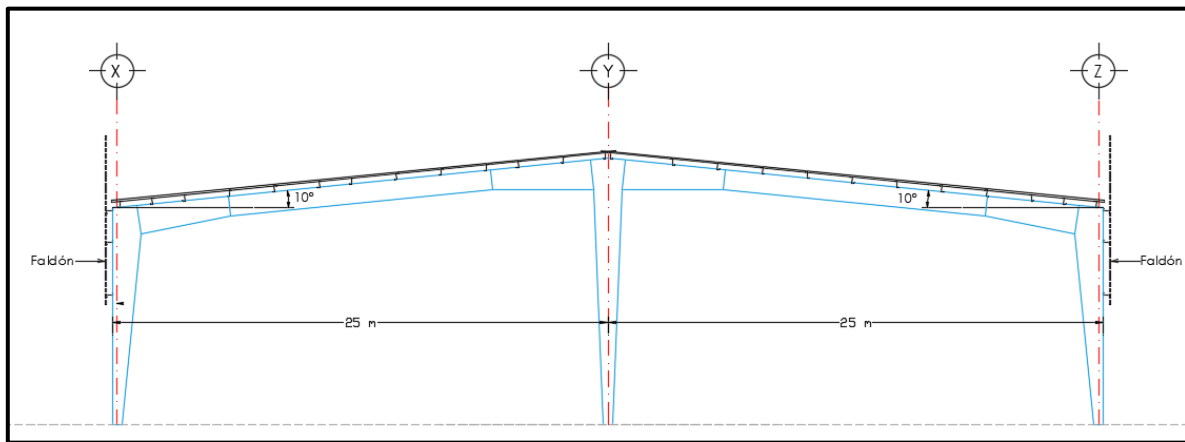


Fig. V.3 Esquema del representativo del problema (autoría propia, 2021).

Cubierta a dos aguas con un ángulo de inclinación de 10° grados cada una y 25 m de longitud. Los pórticos principales de la nave se encuentran a cada 6 m de separación.

a) Cálculo de la longitud de la sobrecarga:

Con ayuda del gráfico III.1 o del anexo 1 se determina que la longitud que se deberá considerar con sobrecarga por granizo es el 75% del total, es decir, 18.75 m para cada agua en medidos desde la parta más baja de la cubierta.

b) Cálculo del peso de sobrecarga:

Con base en la tabla III.5.1 se obtienen los siguientes resultados:

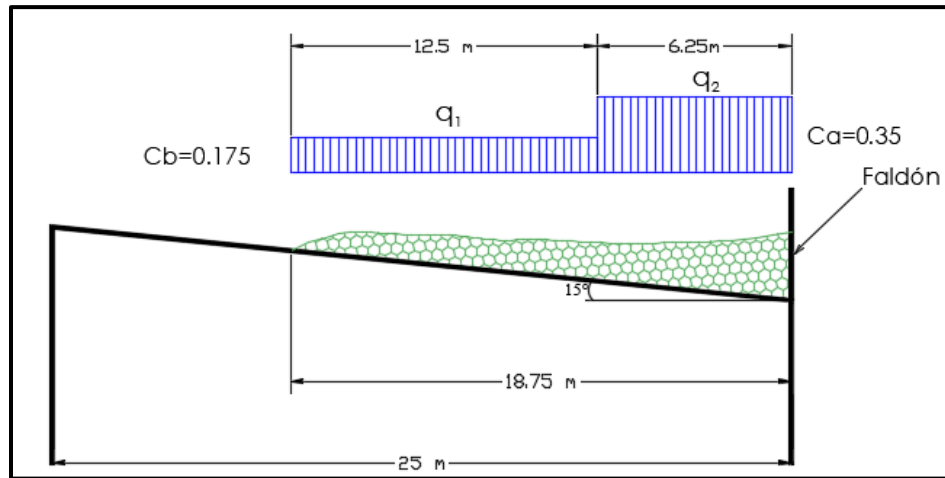


Fig. V.4 Esquema de cargas del problema (autoría propia, 2021).

$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * 0.35 = 122.5 \frac{kg}{m^2}$$

$$q_2 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.50m * 0.175 = 61.25 \frac{kg}{m^2}$$

c) Largueros que soportan la sobrecarga

Considerando una longitud del larguero de 6 m y una carga muerta de 20 kg/m² de la bajada de cargas se sugieren los siguientes largueros:

$$q_{1total} = 142.5 \frac{kg}{m^2}$$

$$q_{2total} = 81.25 \frac{kg}{m^2}$$

Con base en la figura IV.3 las componentes de carga para q1 serían igual a:

$$W_x = 142.5 \frac{kg}{m^2} * \cos(10^\circ) = 140.33 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_y = 142.5 \frac{kg}{m^2} * \sin(10^\circ) = 24.75 \frac{kg}{m^2}$$

Haciendo uso de las ayudas generadas, de la tabla IV.11 se obtiene que para una longitud de 6 m el larguero CF 8" cal. 12 soporta 33.175 kg/m² de carga lateral con dos líneas de contraflambeos, para corroborar el perfil, se acude al gráfico IV.2 donde se lee que el mismo perfil resiste 140.47 kg/m² de carga en el sentido fuerte.

Con estos valores no es necesario realizar una comprobación biaxial ya que precisamente están dados para que siempre se cumpla la condición, sin embargo, se resuelve a continuación para corroborar los datos:

$$W_{ax} = \frac{140.33 \frac{kg}{m} * 6^2}{8} = 631.485 \text{ kg} - m$$

$$W_{ay} = \frac{24.75 \frac{kg}{m} * 6^2}{10} = 89.10 \text{ kg} - m$$

De la tabla IV.6 se elige el perfil CF 8" cal. 12, por lo que se tienen los siguientes resultados:

$$\frac{631.485 \text{ kg} - m}{1268.64 \text{ kg} - m} + \frac{89.10 \text{ kg} - m}{238.86 \text{ kg} - m} = 0.997$$

Por lo que se acepta el perfil propuesto.

V.3. Ejemplo de cubierta a 4 aguas

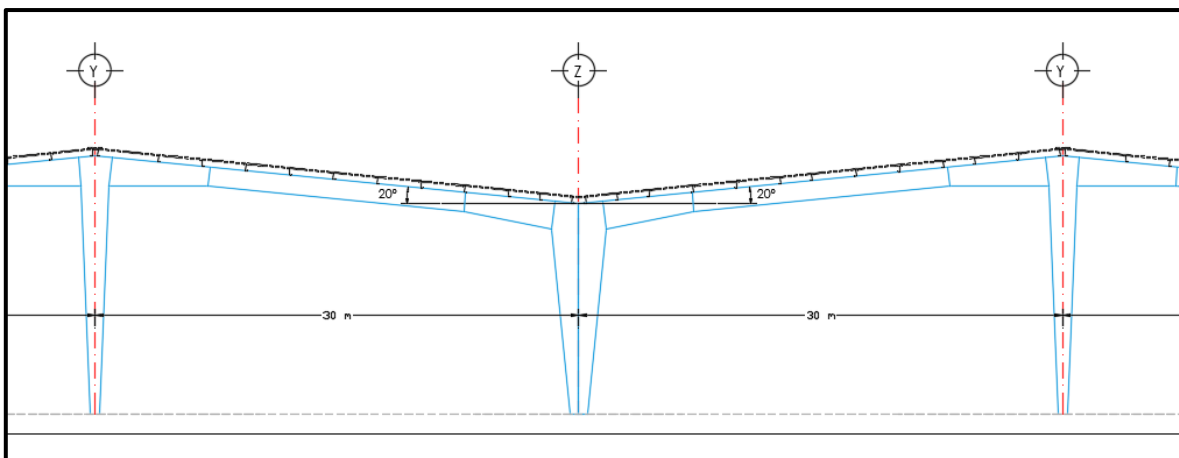


Fig. V.5 Esquema del representativo del problema (autoría propia, 2021).

Cubierta a 4 aguas con un ángulo de inclinación de 20° grados y 30 m de longitud, la separación de los pórticos principales es a cada 10 m.

a) Cálculo de la longitud de la sobrecarga:

Con ayuda del gráfico III.1 o del anexo 1 se determina que la longitud que se deberá considerar con sobrecarga por granizo es el 25% del total, es decir, 7.5 m para cada agua en medidos desde la parta más baja de la cubierta.

a) Cálculo del peso de sobrecarga:

Con base en la tabla III.5 se obtienen los siguientes resultados:

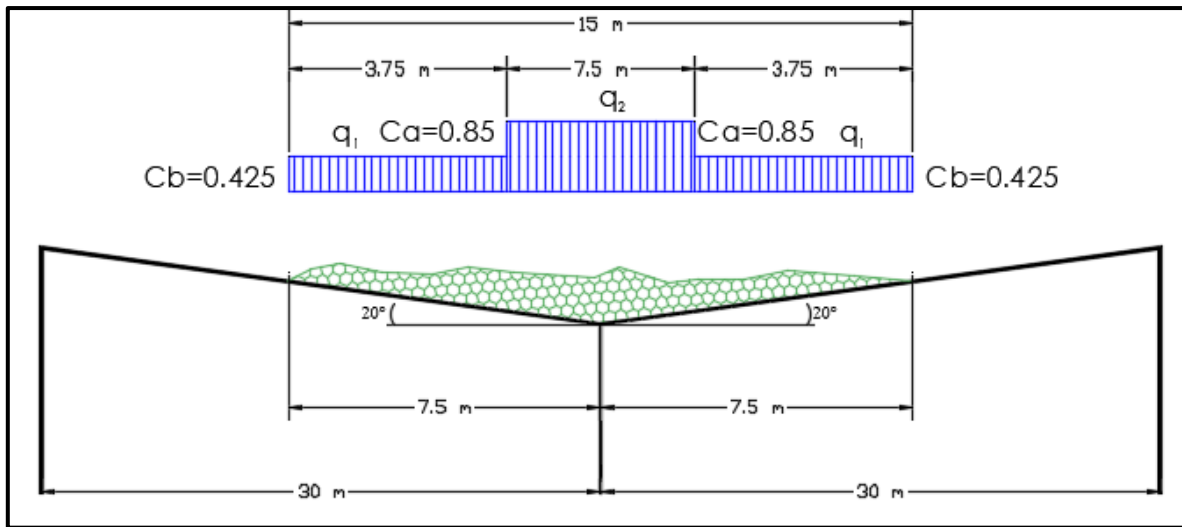


Fig. V.6 Esquema de cargas del problema (autoría propia, 2021).

$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 1.0m * 0.85 = 595 \text{ kg/m}^2$$

$$q_2 = 700 \frac{kg}{m^3} * 1.0m * 0.425 = 297.5 \text{ kg/m}^2$$

b) Largueros que soportan la sobrecarga

Considerando una longitud del larguero de 10 m y una carga muerta de 13 kg/m² de la bajada de cargas se sugieren los siguientes largueros:

$$q_{1total} = 608 \text{ kg/m}^2$$

$$q_{2total} = 310.5 \text{ kg/m}^2$$

Con base en la figura IV.3 las componentes de carga para q1 serían igual a:

$$W_x = 608 \frac{kg}{m^2} * \cos(20^\circ) = 571.33 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_y = 310.5 \frac{kg}{m^2} * \sin(20^\circ) = 106.20 \frac{kg}{m^2}$$

Como las cargas rebasan las permitidas en las ayudas generadas, se propone reducir el ancho tributario de los largueros en la zona de reforzamiento a 40 cm.

$$W_x = 608 \frac{kg}{m^2} * \cos(20^\circ) = 571.33 \frac{kg}{m^2} * .60 = 228.53 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_y = 310.5 \frac{kg}{m^2} * \sin(20^\circ) = 106.20 \frac{kg}{m^2} * 0.60 = 42.48 \frac{kg}{m^2}$$

Haciendo uso de las ayudas generadas, de la tabla IV.16 se obtiene que para una longitud de 6 m el larguero ZF 12" cal. 12 soporta 22.33 kg/m² de carga lateral don dos líneas de contraflambeos, por lo que se deberá usar un perfil en caja, para corroborar el perfil, se acude al gráfico IV.12 donde se lee que el mismo perfil resiste 153.88 kg/m² que en conjunto resistirían 307.76 kg/m² de carga en el sentido fuerte.

V.4. Ejemplo de cubierta curva

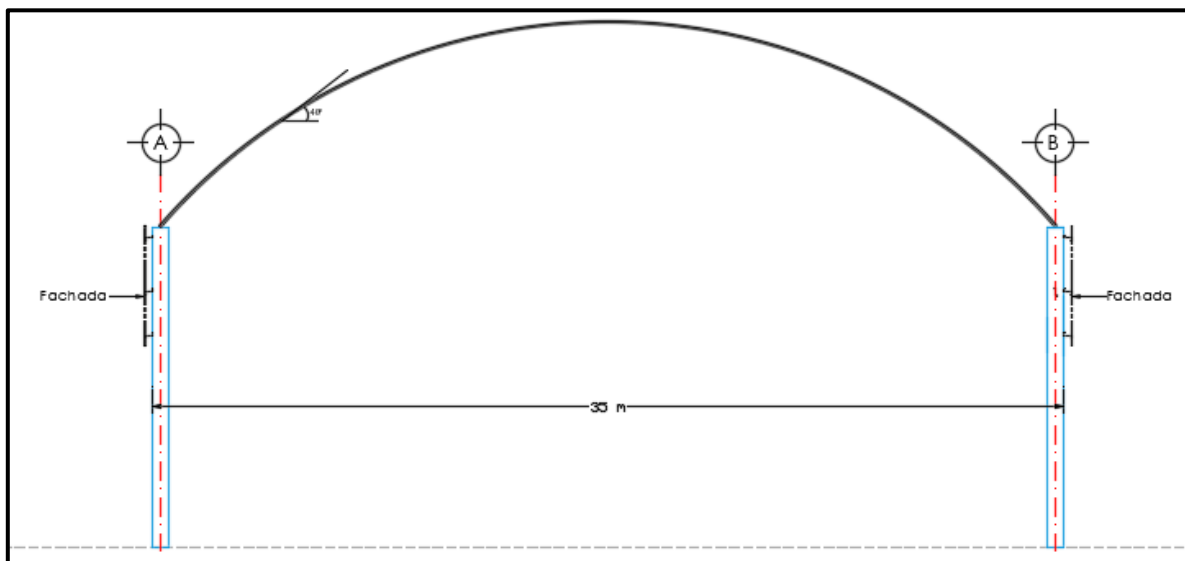


Fig. V.7 Esquema del representativo del problema (autoría propia, 2021).

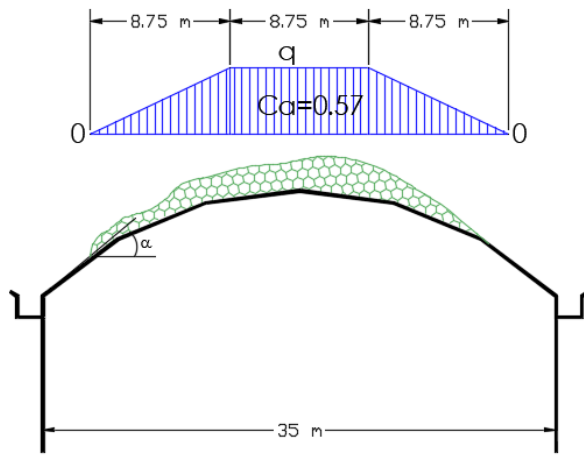
Cubierta curva con un ángulo de inclinación de 40° grados y 35 m de longitud.

a) Cálculo de la longitud de la sobrecarga:

Con ayuda del gráfico III.2 o tabla III.7 se el porcentaje de acumulación que para la pendiente se sugiere, en este caso es del 57% del peso total de diseño.

b) Cálculo del peso de sobrecarga:

Con base en la ecuación 3.2:



$$q_1 = 700 \frac{kg}{m^3} * 0.5m * 0.57$$
$$= 199.5 kg/m^2$$

Fig. V.8 Esquema de cargas del problema (autoría propia, 2021).

CAPÍTULO VI. BAJADAS DE AGUAS PLUVIALES Y CANALONES

El drenaje pluvial juega un papel importante en el servicio de una nave industrial, de un buen sistema depende incluso de pérdidas monetarias en caso de alguna falla. En la práctica, el uso de canalones y bajadas de agua que pueden ser de PVC o lámina son los principales elementos que se colocan para desalojar toda el agua y granizo que cae durante una lluvia sobre los techos.

En mi experiencia profesional en edificios industriales las recomendaciones del diámetro del tubo o del área que debe tener el canal dependía mucho de la empresa fabricante, en muchas ocasiones tienen ya designado un material que vender. Ingenieros de mayor experiencia proponen con base a aprendido, es decir, es poco común tener un documento que respalde el sistema hidráulico de una nave.

Con base a la intensidad de lluvia expuesta en el capítulo III, se calculan las áreas mínimas que deben tener tanto el canalón como las bajadas de agua, para este último se calcula también el diámetro mínimo, las variables son el ancho de la cubierta, así como el largo, se toma una velocidad promedio ya que ésta depende del ángulo de inclinación y el material por donde desliza el agua que en la mayoría de los casos es lámina galvanizada.

Con ayuda de las fórmulas de Manning, se generan las siguientes herramientas de ayuda:

Ancho de cubierta	Largo de cubierta	Área de captación	Gasto	Velocidad de caída	Área requerida	Área requerida	Díametro calculado	Díametro comercial
m	m	m ²	m ³ /s	m/s	m ²	cm ²	cm	in
4	15	60	0.0167	1.5	0.011	111.11	11.89	6
	20	80	0.0222	1.5	0.015	148.15	13.73	8
	25	100	0.0278	1.5	0.019	185.19	15.36	8
	30	120	0.0333	1.5	0.022	222.22	16.82	10
	35	140	0.0389	1.5	0.026	259.26	18.17	10
	40	160	0.0444	1.5	0.030	296.30	19.42	10
	45	180	0.0500	1.5	0.033	333.33	20.60	10
	50	200	0.0556	1.5	0.037	370.37	21.72	10
5	15	75	0.0208	1.5	0.014	138.89	13.30	6
	20	100	0.0278	1.5	0.019	185.19	15.36	6
	25	125	0.0347	1.5	0.023	231.48	17.17	8
	30	150	0.0417	1.5	0.028	277.78	18.81	8
	35	175	0.0486	1.5	0.032	324.07	20.31	8
	40	200	0.0556	1.5	0.037	370.37	21.72	10
	45	225	0.0625	1.5	0.042	416.67	23.03	10
	50	250	0.0694	1.5	0.046	462.96	24.28	10
6	15	90	0.0250	1.5	0.017	166.67	14.57	6
	20	120	0.0333	1.5	0.022	222.22	16.82	8
	25	150	0.0417	1.5	0.028	277.78	18.81	8
	30	180	0.0500	1.5	0.033	333.33	20.60	8
	35	210	0.0583	1.5	0.039	388.89	22.25	10
	40	240	0.0667	1.5	0.044	444.44	23.79	10
	45	270	0.0750	1.5	0.050	500.00	25.23	10
	50	300	0.0833	1.5	0.056	555.56	26.60	12

Tabla. VI.1 Áreas y diámetros mínimos en canalones y bajadas para anchos de cubierta de 4 m a 6 m (autoría propia, 2021).

En la columna 7 “Área requerida” es el área mínima que debe tener el canalón, ya sea de sección trapezoidal o curvo. Se deberá especificar en los planos de construcción el desarrollo de la lámina de tal manera que se cumpla con el valor especificado. Esta columna también indica el valor de una bajada de lámina que por lo general son rectangulares, en caso de no colocar las bajadas de pvc.

Ancho de cubierta	Largo de cubierta	Área de captación	Gasto	Velocidad de caída	Área requerida	Área requerida	Díámetro calculado	Díámetro comercial
m	m	m ²	m ³ /s	m/s	m ²	cm ²	cm	in
7	15	105	0.029	1.5	0.019	194.44	15.73	6
	20	140	0.039	1.5	0.026	259.26	18.17	8
	25	175	0.049	1.5	0.032	324.07	20.31	8
	30	210	0.058	1.5	0.039	388.89	22.25	10
	35	245	0.068	1.5	0.045	453.70	24.03	10
	40	280	0.078	1.5	0.052	518.52	25.69	10
	45	315	0.088	1.5	0.058	583.33	27.25	12
	50	350	0.097	1.5	0.065	648.15	28.73	12
8	15	120	0.033	1.5	0.022	222.22	16.82	8
	20	160	0.044	1.5	0.030	296.30	19.42	8
	25	200	0.056	1.5	0.037	370.37	21.72	8
	30	240	0.067	1.5	0.044	444.44	23.79	8
	35	280	0.078	1.5	0.052	518.52	25.69	10
	40	320	0.089	1.5	0.059	592.59	27.47	12
	45	360	0.100	1.5	0.067	666.67	29.13	12
	50	400	0.111	1.5	0.074	740.74	30.71	12
9	15	135	0.038	1.5	0.025	250.00	17.84	8
	20	180	0.050	1.5	0.033	333.33	20.60	8
	25	225	0.063	1.5	0.042	416.67	23.03	10
	30	270	0.075	1.5	0.050	500.00	25.23	10
	35	315	0.088	1.5	0.058	583.33	27.25	12
	40	360	0.100	1.5	0.067	666.67	29.13	12
	45	405	0.113	1.5	0.075	750.00	30.90	12
	50	450	0.125	1.5	0.083	833.33	32.57	--

Tabla. VI.2 Áreas y diámetros mínimos en canalones y bajadas para anchos de cubierta de 7 m a 9 m (autoría propia, 2021).

En la columna 7 “Área requerida” es el área mínima que debe tener el canalón, ya sea de sección trapezoidal o curvo. Se deberá especificar en los planos de construcción el desarrollo de la lámina de tal manera que se cumpla con el valor especificado. Esta columna también indica el valor de una bajada de lámina que por lo general son rectangulares, en caso de no colocar las bajadas de PVC.

Ancho de cubierta	Largo de cubierta	Área de captación	Gasto	Velocidad de caída	Área requerida	Área requerida	Díametro calculado	Díametro comercial
m	m	m ²	m ³ /s	m/s	m ²	cm ²	cm	in
10	15	150	0.042	1.5	0.028	277.78	18.81	8
	20	200	0.056	1.5	0.037	370.37	21.72	10
	25	250	0.069	1.5	0.046	462.96	24.28	10
	30	300	0.083	1.5	0.056	555.56	26.60	12
	35	350	0.097	1.5	0.065	648.15	28.73	12
	40	400	0.111	1.5	0.074	740.74	30.71	12
	45	450	0.125	1.5	0.083	833.33	32.57	--
	50	500	0.139	1.5	0.093	925.93	34.34	--
11	15	165	0.046	1.5	0.031	305.56	19.72	8
	20	220	0.061	1.5	0.041	407.41	22.78	10
	25	275	0.076	1.5	0.051	509.26	25.46	10
	30	330	0.092	1.5	0.061	611.11	27.89	12
	35	385	0.107	1.5	0.071	712.96	30.13	12
	40	440	0.122	1.5	0.081	814.81	32.21	--
	45	495	0.138	1.5	0.092	916.67	34.16	--
	50	550	0.153	1.5	0.102	1018.52	36.01	--
12	15	180	0.050	1.5	0.033	333.33	20.60	8
	20	240	0.067	1.5	0.044	444.44	23.79	10
	25	300	0.083	1.5	0.056	555.56	26.60	12
	30	360	0.100	1.5	0.067	666.67	29.13	12
	35	420	0.117	1.5	0.078	777.78	31.47	--
	40	480	0.133	1.5	0.089	888.89	33.64	--
	45	540	0.150	1.5	0.100	1000.00	35.68	--
	50	600	0.167	1.5	0.111	1111.11	37.61	--

Tabla. VI.3 Áreas y diámetros mínimos en canalones y bajadas para anchos de cubierta de 10 m a 12 m (autoría propia, 2021).

En la columna 7 “Área requerida” es el área mínima que debe tener el canalón, ya sea de sección trapezoidal o curvo. Se deberá especificar en los planos de construcción el desarrollo de la lámina de tal manera que se cumpla con el valor especificado. Esta columna también indica el valor de una bajada de lámina que por lo general son rectangulares, en caso de no colocar las bajadas de PVC.

GLOSARIO

Fenómeno natural. Cambio producido por la naturaleza, no depende de la acción humana como son las lluvias, tormentas, granizo, entre otros.

Daño estructural. Deterioro importante algún elemento o elementos que componen una estructura y que pongan en riesgo la seguridad de los usuarios, como son los golpes, dobleces, deformaciones de vigas principales o secundarias.

Armadura. Conjunto de perfiles estructurales que unidos forman un solo elemento para dar soporte a las cubiertas.

Granizada. Evento natural que sucede en la presencia de tormentas eléctricas. Se caracteriza por una enorme cantidad de granizo acumulado.

Parque industrial. Superficie delimitada para la construcción de naves industriales en condiciones favorables de infraestructura, equipamiento, transporte y ubicación.

Densidad. También llamado peso volumétrico, es la relación entre el peso y el volumen que ocupa algún material.

Calibre. En láminas y placas, se le denomina al espesor comercial y por lo general se denomina por un número, como, por ejemplo, calibre 20, 21, 22, 24 y 26.

Carga balanceada. Peso uniforme sobre algún elemento, no presenta magnitudes diferentes en el área en la que actúa.

Faldón recto. Muro a base de un bastidor metálico y lámina que se coloca al final de una cubierta con el objetivo de dar fachada.

Drenaje pluvial. Conjunto de elementos que funcionan para desalojar el agua y hielo en una nave industrial, estos elementos son el canalón y las bajadas de agua que pueden ser de PVC o lámina galvanizada.

Contraflamdeo. Elemento que rigidiza el alma de un larguero, se coloca atornillado generalmente y puede ser de perfiles ángulos o redondos.

Flecha máxima permisible. Valor máximo aceptable por la normativa correspondiente y depende inicialmente de la longitud del elemento, se trate de una columna o viga.

Pendiente. Inclinação de un elemento respecto a la horizontal, en otras palabras, diferencia de niveles entre la posición más alta sobre el recorrido horizontal del mismo.

Traslape. Unión que se realiza en los largueros de cubierta solapando dos elementos mediante tornillos generando continuidad.

Sobrecarga. Peso adicional y accidental no considerada en los análisis originales en la zona de revisión.

Carga no balanceada. Peso no uniforme sobre algún elemento, presenta magnitudes diferentes en el área en la que actúa.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. A.C, A. M. (2019). PANORAMA DEL MERCADO INMOVILIARIO INDUSTRIAL. 2Q, 11.
2. ACCIONA, B. A. (2020). *ACCIONA, BUSINESS AS UNUSUAL* . Obtenido de ¿Qué es el cambio climático?: [www. acciona.com](http://www.acciona.com)
3. Aceromex. (2021). Catálogo de productos. México, México.
4. ASCE 7. (2010). American Society of Civil Engineers.
5. Cabrera, A. Z. (2006). *Efecto del granizo en estructuras y modelos de estimación de daños*. Puerto Vallarta, Jalisco .
6. Cabrera, A. Z. (2006). EFECTO DEL GRANIZO EN ESTRUCTURAS Y MODELOS DE ESTIMACIÓN DE DAÑOS. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, (pág. 15). Puerto Vallarta, Jalisco.
7. CENAPRED. (2012). *Mapas e índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos*. México.
8. CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES. (25 de Mayo de 2020). Obtenido de <https://www.gob.mx/cenapred>
9. Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de Obras Civiles - Diseño por viento*.
10. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. (25 de Mayo de 2020). Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua>
11. Desastres, C. N. (2001). *DIAGNÓSTICO DE PELIGROS E IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES EN MÉXICO*. México: Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana.
12. Desastres, C. N. (2019). TORMENTAS SEVERAS. *Serie Fascículos*, 54.
13. DigitalMex. (14 de 04 de 2021). Tremenda granizada en Toluca derrumba techumbre. Toluca, Estado de México, México.
14. E.020. (2016). Norma Peruana. Perú.
15. El Informador. (21 de 03 de 2021). Colapsa el techo de tres naves de la Central de Abasto en CDMX. Ciudad de México, México.
16. EXCELSIOR. (01 de Julio de 2019). El día que el granizo dejó a Guadalajara cubierta de hierlo. 11.
17. Ferre Barniedo. (2021). Catálogo de productos. México.
18. FORTACERO. (2021). Lista general de productos, medidas, calibres y pesos teóricos. 24.

19. Heastad Methods Engineering staff, & Michael E. Meadows. (2002). *Computer Applications in Hydraulic Engineering*.
20. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A. (2014). *Manual de construcción en acero 5ta Edición*. México: Limusa.
21. Lopez Dóriga Digital. (13 de 10 de 2017). Mueren dos estudiantes tras desplome de techo en Bolivia. Bolivia.
22. *MeteoLobios*. (2021). Obtenido de www.meteolobios.es
23. México, G. O. (15 de 12 de 2017). Normas Técnicas Complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones. México, México.
24. Municipio de Puebla. (16 de 03 de 2018). Código reglamentario para el municipio de puebla. Puebla, Puebla, México.
25. *NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION*. (25 de Mayo de 2020). Obtenido de <https://www.weather.gov/ffc/hail>
26. *National Weather Service*. (s.f.). Obtenido de www.weather.gov
27. Norma Ecuatoriana, N. (2015). 3.2.5 Cargas de Granizo. Ecuador.
28. NRS-10. (2010). Norma Colombiana. Colombia.
29. Putnam, P. (2017). Guía para considerar cargas de origen meteorológico (nieve, granizo, hielo y viento) sobre estructuras de cubierta en Bolivia., (pág. 34). Bolivia.
30. RE, M. (2012). *Climate change and its consequences*. Obtenido de www.munichre.com
31. *SERVICIO METEREOLÓGICO NACIONAL*. (25 de Mayo de 2020). Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/>
32. Toluca, E. s. (22 de 04 de 2021). Tras granizada en Toluca colapsa parte de la ENFE. Toluca, Estado de México, México.
33. UNIVERSAL, E. (12 de 05 de 2021). ANALIZAN RETIRO DE TECHO SIN AFECTAR AL TEMPLO MAYOR. 1. MÉXICO, MÉXICO.
34. Zambrana, R. (13 de 03 de 2018). *Propuesta carga de granizo Bolivia*. Bolivia.

ANEXO 1 .- LONGITUDES DE SOBRECARGA DE GRANIZO PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN

Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
2° a 5°	100%	10	10
		15	15
		20	20
		25	25
		30	30
		35	35
		40	40
		45	45
		50	50
Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
7°	90%	10	9.00
		15	13.50
		20	18.00
		25	22.50
		30	27.00
		35	31.50
		40	36.00
		45	40.50
		50	45.00

Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
6°	95.0%	10	9.50
		15	14.25
		20	19.00
		25	23.75
		30	28.50
		35	33.25
		40	38.00
		45	42.75
		50	47.50
Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
8°	85.0%	10	8.50
		15	12.75
		20	17.00
		25	21.25
		30	25.50
		35	29.75
		40	34.00
		45	38.25
		50	42.50

Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
10°	75%	10	7.50
		15	11.25
		20	15.00
		25	18.75
		30	22.50
		35	26.25
		40	30.00
		45	33.75
		50	37.50

Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
15°	50.0%	10	5.00
		15	7.50
		20	10.00
		25	12.50
		30	15.00
		35	17.50
		40	20.00
		45	22.50
		50	25.00

Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
20°	25%	10	2.50
		15	3.75
		20	5.00
		25	6.25
		30	7.50
		35	8.75
		40	10.00
		45	11.25
		50	12.50

Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
21°	20.0%	10	2.00
		15	3.00
		20	4.00
		25	5.00
		30	6.00
		35	7.00
		40	8.00
		45	9.00
		50	10.00

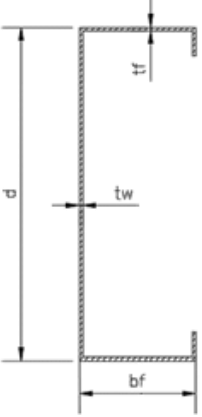
Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
24°	5.0%	10	0.50
		15	0.75
		20	1.00
		25	1.25
		30	1.50
		35	1.75
		40	2.00
		45	2.25
		50	2.50
Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
22°	15.0%	10	1.50
		15	2.25
		20	3.00
		25	3.75
		30	4.50
		35	5.25
		40	6.00
		45	6.75
		50	7.50

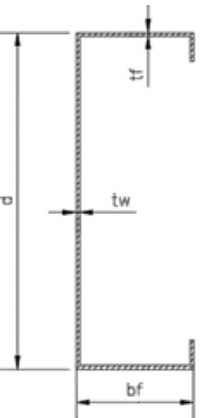
Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
25°	0.0%	10	0.00
		15	0.00
		20	0.00
		25	0.00
		30	0.00
		35	0.00
		40	0.00
		45	0.00
		50	0.00
Pendiente de la cubierta	Porcentaje de acumulación	Longitud del agua (m)	Longitud de sobrecarga (m)
23°	10.0%	10	1.00
		15	1.50
		20	2.00
		25	2.50
		30	3.00
		35	3.50
		40	4.00
		45	4.50
		50	5.00

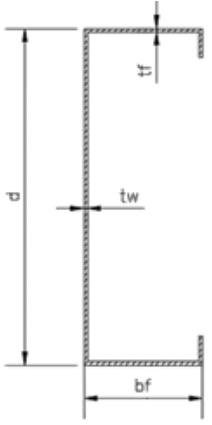
ANEXO 2.- PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LARGUEROS

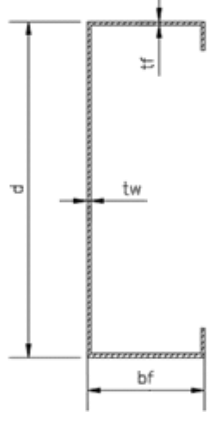
Estas son las propiedades de los largueros analizados en el capítulo IV, se eligieron los más usuales constructivamente hablando y, por ende, aquellos que son más comerciales y es fácil acceso en el mercado. Para aquellos perfiles fuera de este análisis se deberá contemplar su análisis por separado, así como los elementos nuevos propuestos por empresas fabricantes.

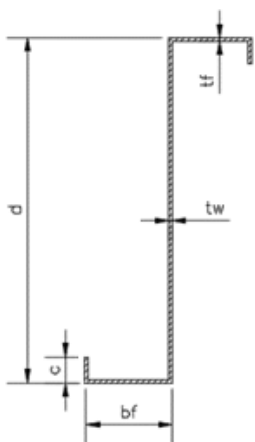
	CF 4" Cal. 14			
	d =	10.1	cm	A = 4.21 cm ²
	bf =	5.08	cm	I _x = 69.87 cm ⁴
	tf =	0.19	cm	I _y = 17.2 cm ⁴
	tw =	0.19	cm	S _x = 13.75 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 5.49 cm ³
	CF 4" Cal. 12			
	d =	10.1	cm	A = 5.78 cm ²
	bf =	5.08	cm	I _x = 90.87 cm ⁴
	tf =	0.266	cm	I _y = 20.57 cm ⁴
	tw =	0.266	cm	S _x = 17.89 cm ³
	r =	6.35	cm	S _y = 6.35 cm ³

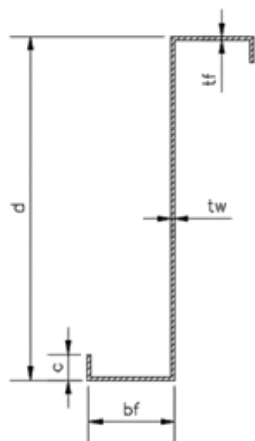
	CF 6" Cal. 14			
	d =	15.2	cm	A = 4.01 cm ²
	bf =	5.08	cm	I _x = 178.49 cm ⁴
	tf =	0.19	cm	I _y = 18.29 cm ⁴
	tw =	0.19	cm	S _x = 23.42 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 5.14 cm ³
	CF 6" Cal. 12			
	d =	15.2	cm	A = 6.16 cm ²
	bf =	5.08	cm	I _x = 238.75 cm ⁴
	tf =	0.266	cm	I _y = 23.72 cm ⁴
	tw =	0.266	cm	S _x = 31.33 cm ³
	r =	6.35	cm	S _y = 6.65 cm ³

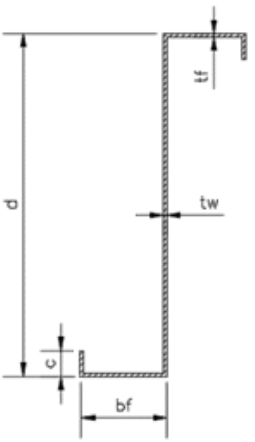
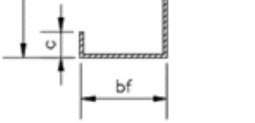
	CF 8" Cal. 14			
	d =	20.3	cm	A = 4.89 cm ²
	bf =	6.35	cm	I _x = 407.63 cm ⁴
	tf =	0.19	cm	I _y = 35.26 cm ⁴
	tw =	0.19	cm	S _x = 38.37 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 7.68 cm ³
	CF 8" Cal. 12			
	d =	20.3	cm	A = 7.71 cm ²
	bf =	6.35	cm	I _x = 566.08 cm ⁴
	tf =	0.266	cm	I _y = 49.58 cm ⁴
	tw =	0.266	cm	S _x = 55.72 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 10.49 cm ³

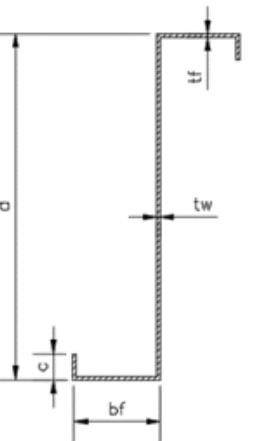
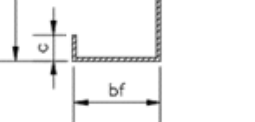
	CF 10" Cal. 14			
	d =	25.4	cm	A = 4.95 cm ²
	bf =	6.35	cm	I _x = 694.48 cm ⁴
	tf =	0.19	cm	I _y = 37.59 cm ⁴
	tw =	0.19	cm	S _x = 52.42 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 7.83 cm ³
	CF 10" Cal. 12			
	d =	25.4	cm	A = 7.86 cm ²
	bf =	6.35	cm	I _x = 967.04 cm ⁴
	tf =	0.266	cm	I _y = 52.93 cm ⁴
	tw =	0.266	cm	S _x = 76.14 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 11.15 cm ³

	CF 12" Cal. 14			
	d =	30.5	cm	A = 5.16 cm ²
	bf =	8.89	cm	I _x = 1274.75 cm ⁴
	tf =	0.19	cm	I _y = 90.26 cm ⁴
	tw =	0.19	cm	S _x = 64.71 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 13.44 cm ³
	CF 12" Cal. 12			
	d =	30.5	cm	A = 8.98 cm ²
	bf =	8.89	cm	I _x = 1814.84 cm ⁴
	tf =	0.266	cm	I _y = 127.36 cm ⁴
	tw =	0.266	cm	S _x = 108.52 cm ³
	r =	4.76	cm	S _y = 19.13 cm ³

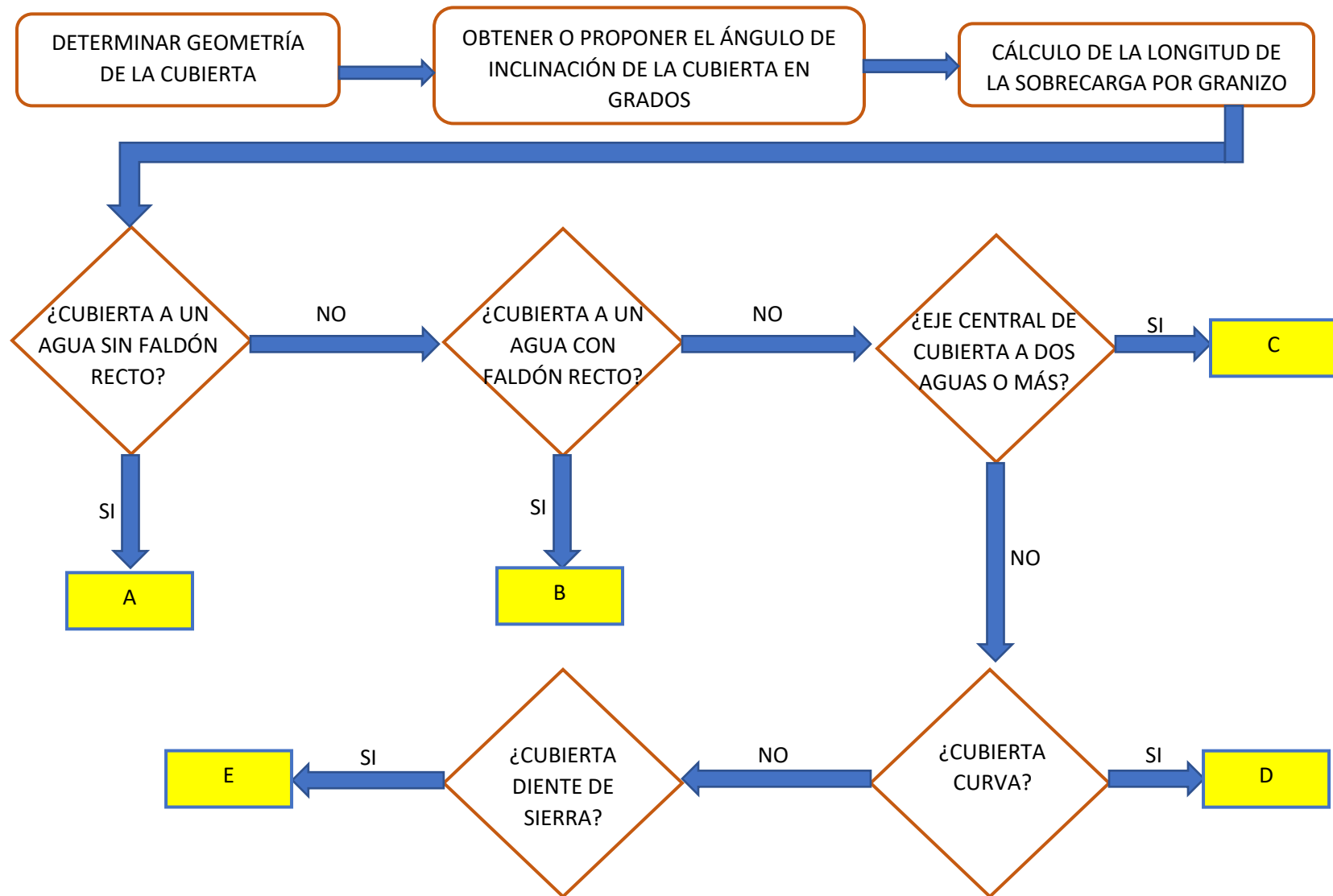
		CF 6" Cal. 14			
		d =	15.2	cm	A = 4.83 cm ²
		bf =	6.03	cm	I _x = 207.2 cm ⁴
		tf =	0.19	cm	I _y = 80.86 cm ⁴
		tw =	0.19	cm	S _x = 26.7 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 7.84 cm ³
		CF 6" Cal. 12			
		d =	15.2	cm	A = 7.84 cm ²
		bf =	6.03	cm	I _x = 286.7 cm ⁴
		tf =	0.266	cm	I _y = 81.72 cm ⁴
		tw =	0.266	cm	S _x = 36.87 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 11.13 cm ³

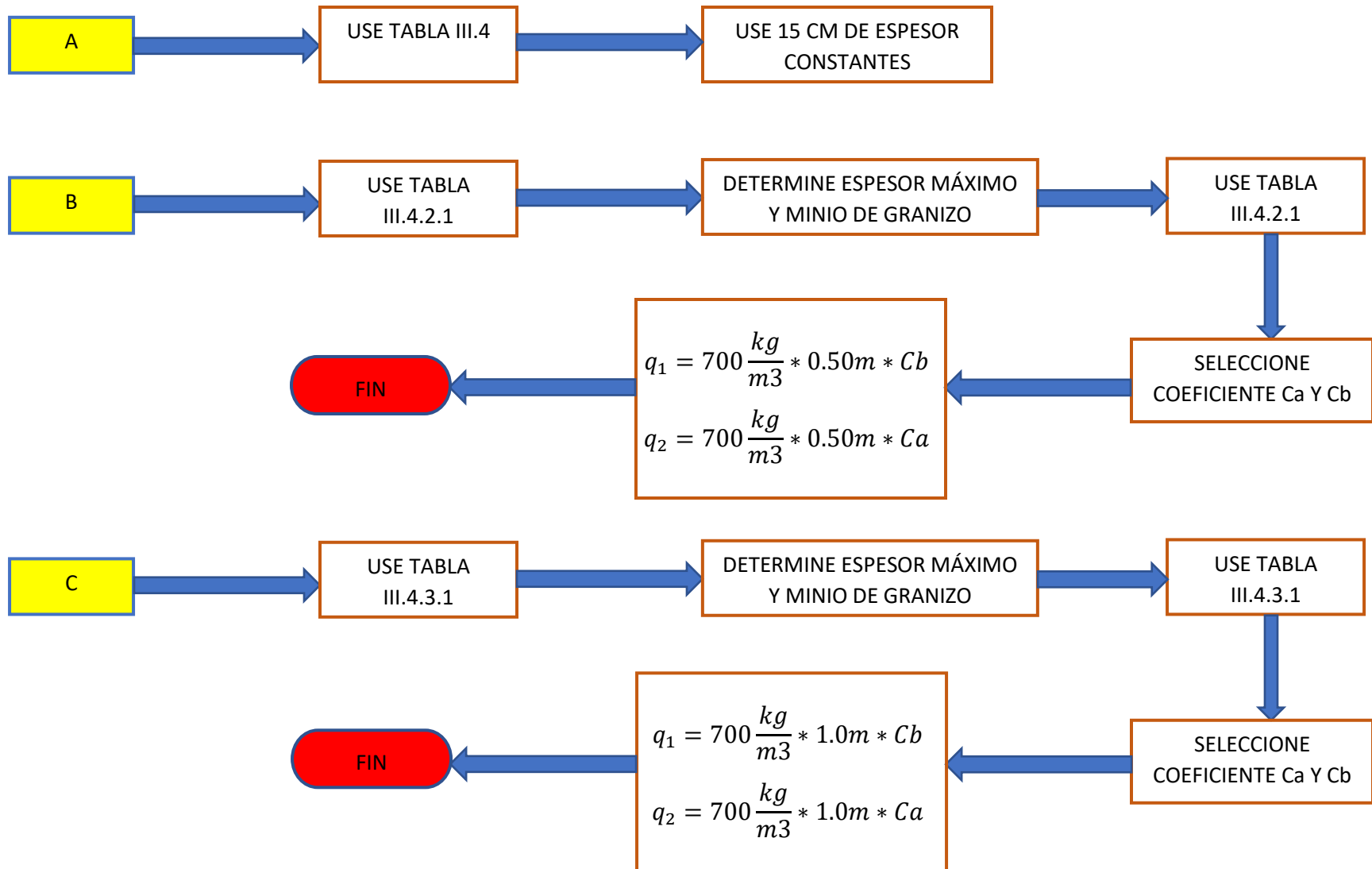
		CF 8" Cal. 14			
		d =	20.3	cm	A = 4.92 cm ²
		bf =	6.03	cm	I _x = 408 cm ⁴
		tf =	0.19	cm	I _y = 57.17 cm ⁴
		tw =	0.19	cm	S _x = 39.46 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 7.82 cm ³
		CF 8" Cal. 12			
		d =	20.3	cm	A = 7.74 cm ²
		bf =	6.03	cm	I _x = 566.9 cm ⁴
		tf =	0.266	cm	I _y = 81.76 cm ⁴
		tw =	0.266	cm	S _x = 54.83 cm ³
		r =	4.79	cm	S _y = 11.09 cm ³

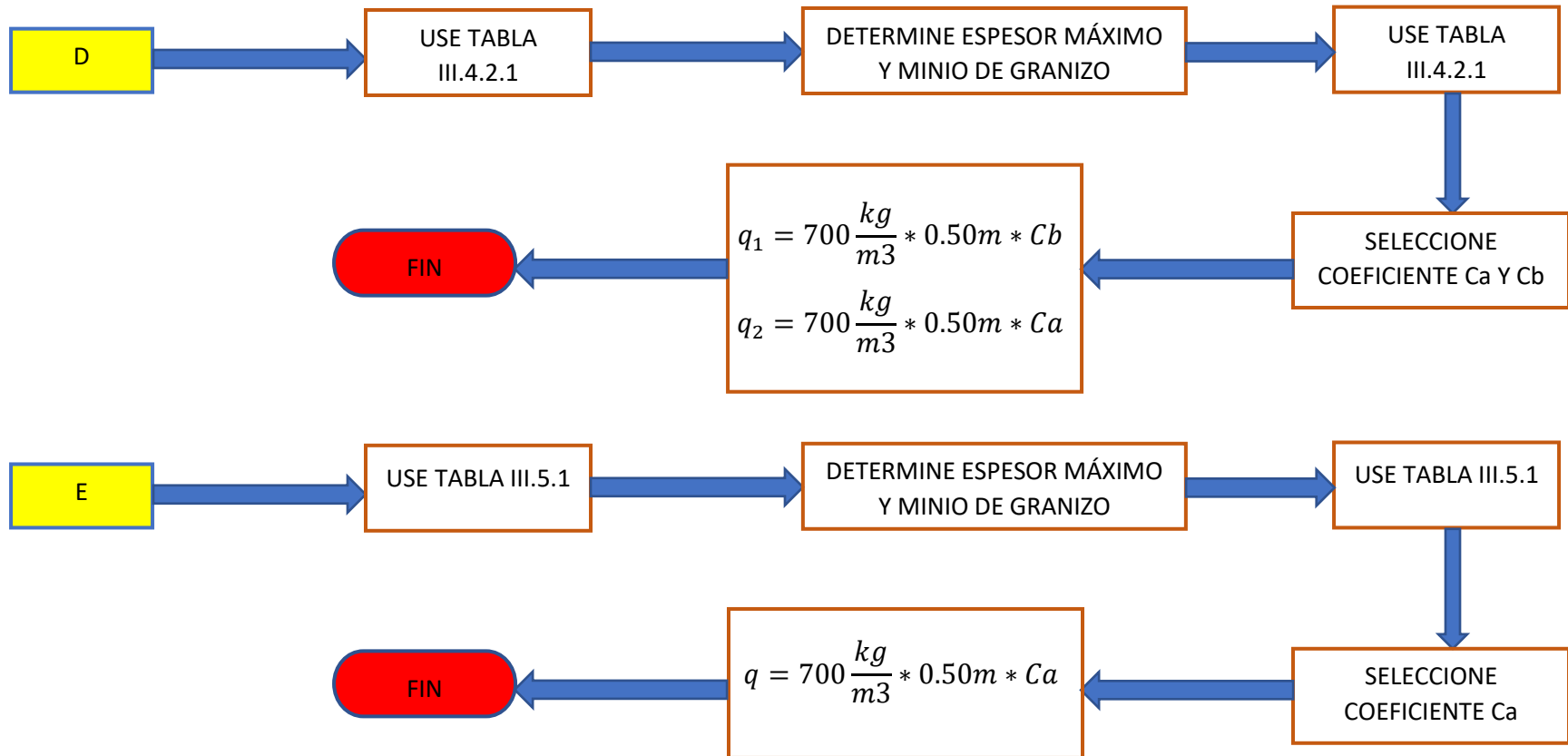
		CF 10" Cal. 14			
		d =	25.4	cm	A = 4.98 cm ²
		bf =	6.03	cm	I _x = 679.1 cm ⁴
		tf =	0.19	cm	I _y = 57.19 cm ⁴
		tw =	0.19	cm	S _x = 49.15 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 7.8 cm ³
		CF 10" Cal. 12			
		d =	25.4	cm	A = 7.9 cm ²
		bf =	6.03	cm	I _x = 968.9 cm ⁴
		tf =	0.266	cm	I _y = 81.79 cm ⁴
		tw =	0.266	cm	S _x = 73.27 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 11.07 cm ³

		CF 12" Cal. 14			
		d =	30.5	cm	A = 5.43 cm ²
		bf =	7.94	cm	I _x = 1263.5 cm ⁴
		tf =	0.19	cm	I _y = 136.86 cm ⁴
		tw =	0.19	cm	S _x = 67.15 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 13.86 cm ³
		CF 12" Cal. 12			
		d =	30.5	cm	A = 9.35 cm ²
		bf =	7.94	cm	I _x = 1819.4 cm ⁴
		tf =	0.266	cm	I _y = 194.6 cm ⁴
		tw =	0.266	cm	S _x = 112.64 cm ³
		r =	4.76	cm	S _y = 19.62 cm ³

ANEXO 3.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DE LA SOBRECARGA PARA UN TECHO DE NAVE INDUSTRIAL







ANEXO 4.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DE LARGUEROS DE CUBIERTA

